

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2015

Silvie Prchalová

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky

Kmitočtové filtry s operačním zesilovačem  
s Butterworthovou a Čebyševovou charakteristikou  
Operational Amplifier Frequency Filters with Butterworth and  
Chebyshev Characteristic

2015

Silvie Prchalová

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky

## Zadání bakalářské práce

Student: **Silvie Prchalová**

Studijní program: B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor: 2601R013 Telekomunikační technika

Téma: Kmitočtové filtry s operačním zesilovačem s Butterworthovou a  
Čebyševovou charakteristikou  
Operational Amplifier Frequency Filters with Butterworth and  
Chebyshev Characteristic

Zásady pro vypracování:

1. Prostudujte a popište metodu kaskádní syntézy aktivních filtrů.
2. Navrhněte dolní, horní a pásmovou propust podle pokynů vedoucího práce.
3. Návrh ověřte simulací programem SNAP a následně ověřte kmitočtové vlastnosti filtrů laboratorním měřením.
4. Vyhodnoťte výsledky měření.

Seznam doporučené odborné literatury:

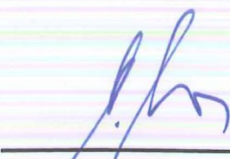
- [1] TIETZE, U; SCHENK, C. *Electronic circuits : design and applications*. Berlin : Springer, 1991. 928 s. ISBN 3-540-50608-X.
- [2] VRBA K; VRBA, K. *Technika analogových obvodů a systémů : sbírka příkladů*. Brno : VUT, 1989.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Dr. Ing. Libor Gajdošík**

Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2015

  
doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

## Prohlášení studenta

„Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně. Uvedla jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpala.“

Dne: 6.5.2015

  
.....

Podpis studenta

## Poděkování

Ráda bych poděkovala vedoucímu bakalářské práce **Dr. Ing. Liborovi Gajdošíkovi** za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této práce.

## Abstrakt

V teoretické části se bakalářská práce na téma „Kmitočtové filtry s operačním zesilovačem s Butterworthovou a Čebyševovou charakteristikou“ zabývá popisem metody kaskádní syntézy aktivních filtrů. Cílem bakalářské práce je navrhnout dolní, horní a pásmovou propust podle pokynů vedoucího práce. V praktické části je naším úkolem ověřit návrh simulací programem SNAP a následně ověřit kmitočtové vlastnosti filtrů laboratorním měřením. Jako poslední bod práce je vyhodnocení výsledků měření.

## Klíčová slova

Kmitočtový filtr, operační zesilovač, kaskádní syntéza, dolní propust, horní propust, pásmová propust

## Abstract

In the theoretical part of the thesis entitled "Frequency filters with operational amplifier with Butterworth and Chebyshev characteristic" deals description of the method of synthesis cascade active filters. Aim of this work is to propose low pass, high pass and band pass filter according to the instructions of the Head. In the practical part of my job is to verify the proposals SNAP simulation program and then verify the frequency response of filters laboratory measurements. As a final point of work is to evaluate the results.

## Keys words

Frequency filter, operational amplifier, cascade, low pass, high pass, band pass

## Seznam použitých veličin, symbolů a zkratek

$A[\text{dB}]$  úroveň přenosu v decibelech zesílení

$A_{\text{max}}[\text{dB}]$  maximální dovolená hodnota útlumu v propustném pásmu

$A_{\text{min}}[\text{dB}]$  minimální požadovaná hodnota útlumu v nepropustném pásmu

$C$  elektrická kapacita

$F(p)$  výsledná přenosová funkce

$F_1, F_n$  přenosové funkce jednotlivých článků

$H$  zesílení, přenosová funkce

$H_0$  konstanta přenosu pro dolní propust

$H_\infty$  konstanta přenosu pro horní propust

$L$  indukčnost

$OZ$  operační zesilovač

$Q$  činitel jakosti

$R$  elektrický odpor

$U_1$  vstupní napětí

$U_2$  výstupní napětí

$a$  konstanta, polynom

$b$  konstanta, polynom

$d_i$  absolutní odchylka

$\bar{d}$  průměrná absolutní odchylka

$\cosh$  hyperbolický kosinus

$f[\text{Hz}]$  kmitočet v Hertzích

$f_0$  středový kmitočet

$f_d$  zlomový kmitočet dolní propusti

$f_h$  zlomový kmitočet horní propusti

$i$  index

$j$  imaginární jednotka

$k$  selektivní koeficient

$\lg$  dekadický logaritmus

$n$  počet článků v kaskádě

$u$  napětí

$\nu f$  vysokofrekvenční

$\bar{x}$  aritmetický průměr

$\Delta f, \Delta \omega$  šířka pásma

$\alpha$  konstanta

$\pi$  Ludolfovo číslo

$\omega$  úhlový kmitočet

$\omega_0$  středový úhlový kmitočet, normovací konstanta

$\omega_c$  zlomový úhlový kmitočet

$\Omega_p$  význačný kmitočet

$\Omega_s$  činitel selektivity, bezrozměrná jednotka



# Obsah

Úvod.....	3
1. Typy filtrů .....	4
1.1 Aktivní filtry.....	4
1.2 Dolní propust.....	6
1.3 Horní propust .....	7
1.4 Pásmová propust .....	8
1.5 Pásmová zádrž.....	8
1.6 Typy aproximací .....	9
1.6.1 Butterworthova aproximace .....	9
1.6.2 Čebyševova aproximace.....	10
2. Postup při návrh filtrů .....	11
2.1 Toleranční pole .....	11
2.2. Kmitočtové transformace filtrů na normovanou dolní propust .....	11
2.2.1 Transformace dolní propusti na normovanou dolní propust .....	12
2.2.2 Transformace horní propusti na normovanou dolní propust .....	12
2.2.3 Transformace pásmové propusti na normovanou dolní propust .....	13
2.2.4 Transformace pásmové zádrže na normovanou dolní propust.....	13
2.2.5 Výpočet n tého řádu filtru .....	14
3. Návrh jednotlivých propustí.....	15
3.1 Návrh Butterworthovy dolní propusti .....	15
3.2 Návrh Čebyševovy dolní propusti.....	17
3.3 Návrh Butterworthovy horní propusti .....	19
3.4 Návrh Čebyševovy horní propusti .....	21
3.5 Návrh Butterworthovy širokopásmové pásmové propusti .....	22
3.6 Návrh Čebyševovy širokopásmové pásmové propusti.....	24
3.7 Návrh Butterworthovy úzkopásmové pásmové propusti .....	26
3.8 Návrh Čebyševovy úzkopásmové pásmové propusti.....	28
4. Laboratorní měření.....	33
4.1 Porovnání Butterworthovy dolní propusti .....	34
4.2 Porovnání Čebyševovy dolní propusti .....	35
4.3 Porovnání Butterworthovy horní propusti.....	36
4.4 Porovnání Čebyševovy horní propusti .....	37
4.5 Porovnání širokopásmové Butterworthovy pásmové propusti.....	38

4.6 Porovnání širokopásmové Čebyševovy pásmové propusti .....	39
4.7 Porovnání úzkopásmové Butterworthovy pásmové propusti .....	40
4.8 Porovnání úzkopásmové Čebyševovy pásmové propusti .....	41
5. Závěr .....	42
Literatura .....	44
Seznam obrázků .....	45
Seznam tabulek .....	47
Seznam grafů .....	48
Seznam příloh .....	49

# Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá tématem kmitočtových filtrů s aktivním prvkem, v našem případě konkrétně s operačním zesilovačem s využitím Butterworthovy a Čebyševovy aproximace. Výhodou zapojení s operačním zesilovačem je konstrukce bez cívek, nevýhodou pak nutnost napájecího zdroje, bez něhož aktivní prvek nepracuje. Kmitočtové filtry lze nalézt v elektronice, elektrotechnice, radiotechnice nebo třeba elektroakustice.

Práce je rozdělena do více částí. První část je teoretická a popisuje metodu kaskádní syntézy aktivních filtrů včetně aproximace a syntézy. Její předností je systematickosti a jednoduchost návrhu. V této části se rovněž seznámíme se základními typy filtrů, dvěma aproximacemi použitými v této práci a to Butterworthovou a Čebyševovou aproximací. Další část je zaměřena na teoretický návrh dolní, horní a pásmové propusti pomocí struktury Bridgman-Brennan stanovením tolerančního pole za použití kmitočtových transformací na normovanou dolní propust, výpočtem jednotlivých prvků obvodu a jejich následnou simulaci v programu SNAP.

Poslední část je částí praktickou. V ní se seznámíme s výsledky laboratorního měření. V grafech porovnáme simulované a praktické naměřené hodnoty. V tabulkách u jednotlivých porovnání najdeme vypočtené hodnoty pro převod mV na dB, absolutní odchylku měření, aritmetický průměr a průměrnou absolutní odchylku měření.

# 1. Typy filtrů

## 1.1 Aktivní filtry

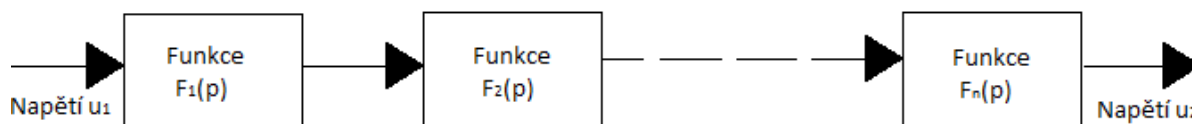
Jsou filtry využívající aktivní součástky pro vytvoření přenosových funkcí s požadavkem závislosti na frekvenci. Nyní se jako aktivní prvky používají výhradně operační zesilovače (OZ). Dostupná kmitočtová oblast je shora omezená použitým OZ (do 1MHz), zdola není použití aktivních filtrů omezeno. Pokud chceme zjistit obsah vyšších harmonických v síti, musíme provést analýzu napětí a proudu. Výhodou aktivních filtrů je konstrukce bez cívek a dosažení lepších hodnot vstupní a výstupní impedance, což povoluje kaskádní řazení filtrů.

Pro kaskádní řazení platí:

$$F(p) = F_1(p) \cdot F_2(p) \dots F_n(p) \quad (1.1.1)$$

Kde  $F_1$  až  $F_n$  jsou přenosové funkce jednotlivých článků,  $n$  je počet článků v kaskádě a  $F$  je výsledná přenosová funkce.

Kaskádní syntéza je jednou z několika možností jak navrhovat aktivní filtry. Její předností je jednoduchost a systematickост návrhu. Návrh je založen na tom, že celý filtr  $n$ -tého řádu se vytvoří kaskádním spojením několika základních stupňů filtrů prvního a druhého řádu. Výsledný přenos  $F$  je dán součinem  $F_n$  jednotlivých stupňů. Aby se přenosy jednotlivých stupňů nezměnily po zapojení do kaskády, musí být splněn předpoklad, že výstup předchozího stupně nesmí být ovlivněn připojením vstupu následujícího stupně. Pro návrh stupňů se využívají zapojení s operačním zesilovačem. Zde zmíněný předpoklad je splněn, protože vstupní odpory, zapojení bývají velké ( $k\Omega$  až  $M\Omega$ ) a výstupní odpory malé (jednotky  $\Omega$ ), výstup se chová vlastně jako napěťový zdroj a vstup jako zátěž o velkém odporu[2].



Obrázek 1.1.1 - Kaskádní řazení

Konstrukce aktivních filtrů se provádí v zásadě dvěma způsoby. První se zakládá na použití jednoho OZ a relativně složité (více smyčkové) RC zpětné vazby. Návrh je složitý a při realizaci by mohly vzniknout problémy s přesným nastavením.

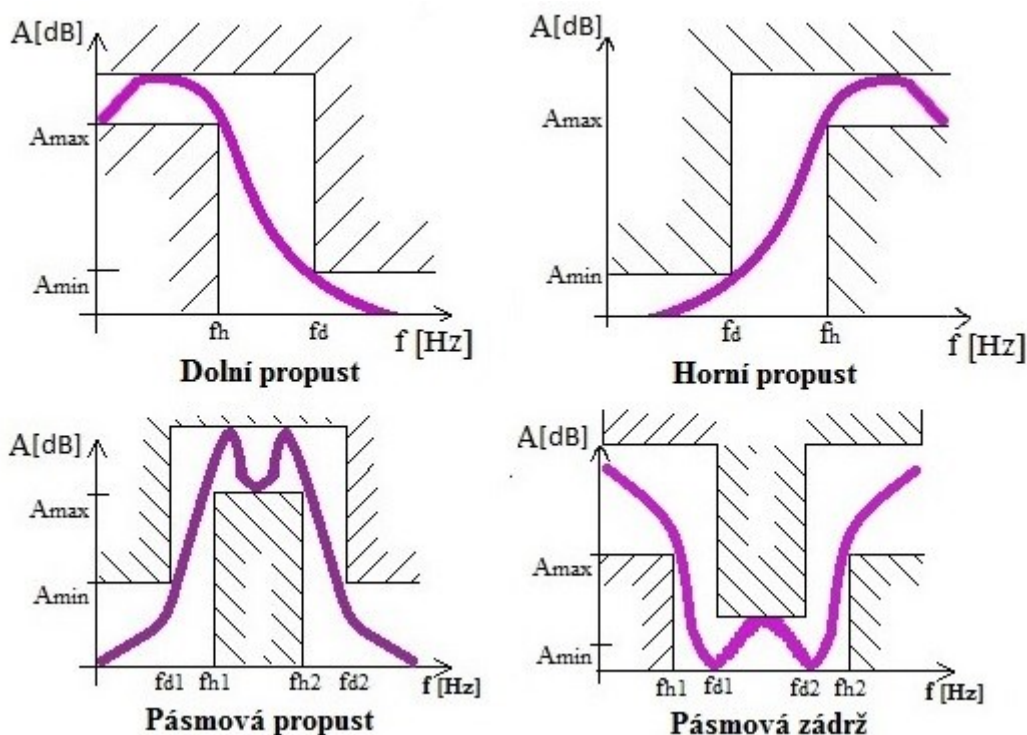
Druhým jednodušším způsobem je řazení filtrů s jednoduchými přenosovými funkcemi. Z těchto článků je možné sestavit jakoukoliv přenosovou funkci.

Návrh filtrů se skládá ze dvou fází:

- Aproximace** – požadavky na přenosovou funkci se hledají na analytické vyjádření v daném intervalu. Aproximace musí být fyzikálně uskutečnitelná.
- Syntéza** – hledání vhodné obvodové struktury, kvalifikace a výpočet prvků zadané struktury

Z hlediska přenosových vlastností rozlišujeme čtyři základní typy filtrů:

- Dolní propust (low pass)
- Horní propust (high pass)
- Pásmová propust (band pass)
- Pásmová zádrž (notch filter)



Obrázek 1.1.2 - Základní typy kmitočtových charakteristik filtrů

## 1.2 Dolní propust

Hranice mezi propustným a nepropustným pásmem nastává při lomové frekvenci  $f_0$ . Při zadané frekvenci by mohla aproximovaná charakteristika konkrétního filtru dosáhnout maximální odchylku oproti charakteristice skutečné. Vezmeme si dolní propust prvního řádu, která má frekvenční přenos

$$F(j\omega) = \frac{1}{1+j\omega\tau} \quad (1.2.1)$$

Typickým znakem tohoto filtru pro frekvence menší než  $f_0$  je možné aproximovat pomocí přímky, která je rovnoběžná s frekvenční osou.

$$\omega_0 = \frac{1}{\tau} \quad (1.2.2)$$

a pro napět'ový přenos

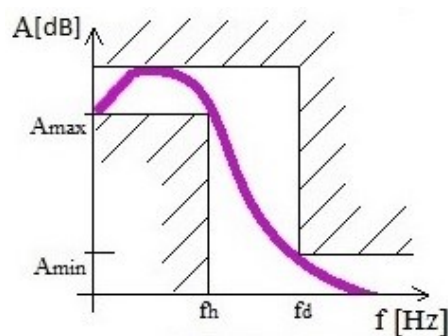
$$\frac{1}{\sqrt{1+1}} = 0,707 \text{ tj. } -3 \text{ dB.} \quad (1.2.3)$$

Používají se tzv. filtry polynomového typu, jejichž vlastnosti vyjadřuje aproximace

$$A_n(p) = \frac{1}{F_n(p)}, \quad (1.2.4)$$

kde  $F_n(p)$  je polynom ve tvaru

$$F_n(p) = a_{nn}p^n + a_{n-1n}p^{n-1} + a_{jn}p^j + \dots + a_{1n}p + 1 \quad (1.2.5)$$



Obrázek 1.2.1 - Dolní propust

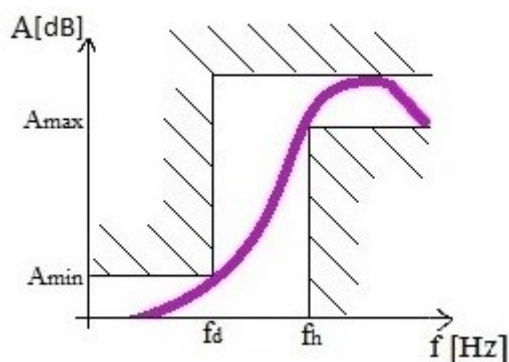
Koeficienty  $a_{jn}$  jsou funkcí prvků obvodu a zesílení. Podle způsobu volby polynomu dostaneme filtry různých vlastností. Nejpoužívanějšími jsou Butterworthovy, Čebyševovy a Besselovy filtry.

Určení koeficientů jednotlivých typů filtrů jsou komplikované, a proto jsou uváděny v literatuře ve formě tabulek.

V regulační technice se v převážné míře používají Butterworthovy filtry, které mají v pásmu propouštění plochou amplitudovou charakteristiku.

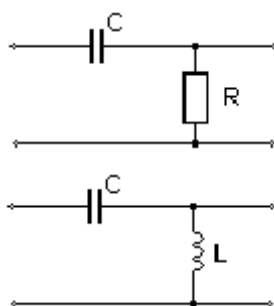
### 1.3 Horní propust

Horní frekvenční propust, nebo také dolní frekvenční zadrž je obvod, který propouští vysoké frekvence až po námi předem určenou dolní frekvenci  $f_d$ ,  $f_d$ -je určeno poklesem útlumu o 3dB lineární frekvenční charakteristiky. Frekvence od  $f_d$  bude filtrem potlačována.



Obrázek 1.3.1 - Horní propust

Frekvence blízké  $f_d$  jsou potlačované méně. Jedná se o strmost, která charakterizuje kvalitní oříznutí. Nejjednodušší horní frekvenční propust sestavíme pomocí LC a RC součástek.



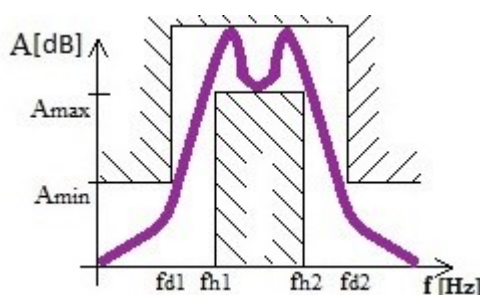
Obrázek 1.3.2 - Frekvenční propust

Ze zapojení kondenzátoru v horní propusti jde názorně vidět, že kondenzátor pracuje jako kapacitátor. Odděluje statické body předcházejícího a následujícího obvodu. U LC zapojení je nutné změřit reálnou hodnotu odporu cívky, která se projeví v hodnotě výstupní impedance.

## 1.4 Pásmová propust

Pásmová propust označuje lineární filtr, který propouští signál jen určitých frekvencí.

Používá se v audio technice, kde se užívá pro rozdělení signálu, proto aby se mohly jednotlivé frekvenční úseky ovlivňovat samostatně.



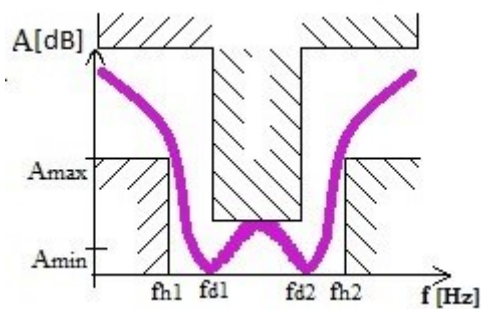
Obrázek 1.4.1 - Pásmová propust

Kombinací dolní a horní propusti sestavíme filtr, který propustí určené pásmo. Hranice propustnosti jsou dány nastavením jednotlivých propustí. Rozdíl hranic je dán šířkou pásma. Základním parametrem kvality filtrů je strmost. U většiny používaných filtrů se používá RLC součástek. Hodnota strmosti záleží na kvalitě a použitých LC součástek. U kondenzátoru se zabýváme především o ztrátový činitel a u cívek o reálný odpor vinutí cívek. Platí, že čím je vyšší reálný odpor cívky, tím menší je strmost frekvenční charakteristiky. Pokud potřebujeme snížit strmost, použijeme rezistor, který připojíme sériově na cívku.

## 1.5 Pásmová zadrž

Pomocí pásmové propusti můžeme sestavit i takovou charakteristiku, která bude opakem. Tento filtr použijeme v případě, kdy potřebujeme zamezit průchodu předem známé frekvenční oblasti do obvodu. Šířka pásma je zadána jako rozdíl horní a dolní ořezávací frekvence. I tady se řeší problém použití strmosti filtrů. Přenos je vždy ztrátový.





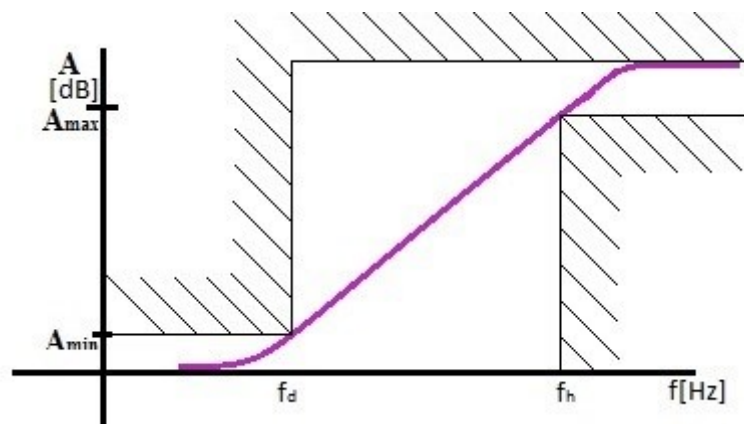
Obrázek 1.5.1 - Pásmová zádrž

Použití zejména v televizní a vř technice.

## 1.6 Typy aproximací

### 1.6.1 Butterworthova aproximace

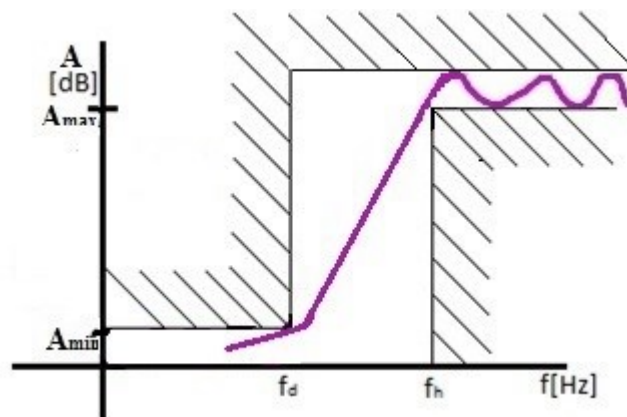
Tato aproximace patří mezi nejpoužívanější, protože je obvykle přijatelným kompromisem mezi požadovanou linearitou fázové charakteristiky a dosažitelným útlumem modulové kmitočtové charakteristiky při nízkém řádu filtru. Při obvykle požadovaném zvlnění 3 dB v propustném pásmu lze nalézt potřebný řád filtru přímo z modulových charakteristik na obr. 1.6.1.1. [1]



Obrázek 1.6.1.1 - Butterworthova aproximace

## 1.6.2 Čebyševova aproximace

Tato aproximace má nejstrmější charakteristiku v přechodném pásmu s potlačením přenosu v pásmu nepropustném. Zvlnění je propustné pouze v částech charakteristiky a nulové body v potlačeném pásmu. Nevýhoda této aproximace je nelinearita fázové charakteristiky a odpovídá větší nekonstantnosti. Pokud zvolíme malé zvlnění, tím se sníží strmost alepší se fázové vlastnosti. Má v propustném pásmu modulovou charakteristiku zvlněnou. Pokud zvolíme malé zvlnění, částečně se tím sníží strmost.



Obrázek 1.6.2.1 - Čebyševova aproximace

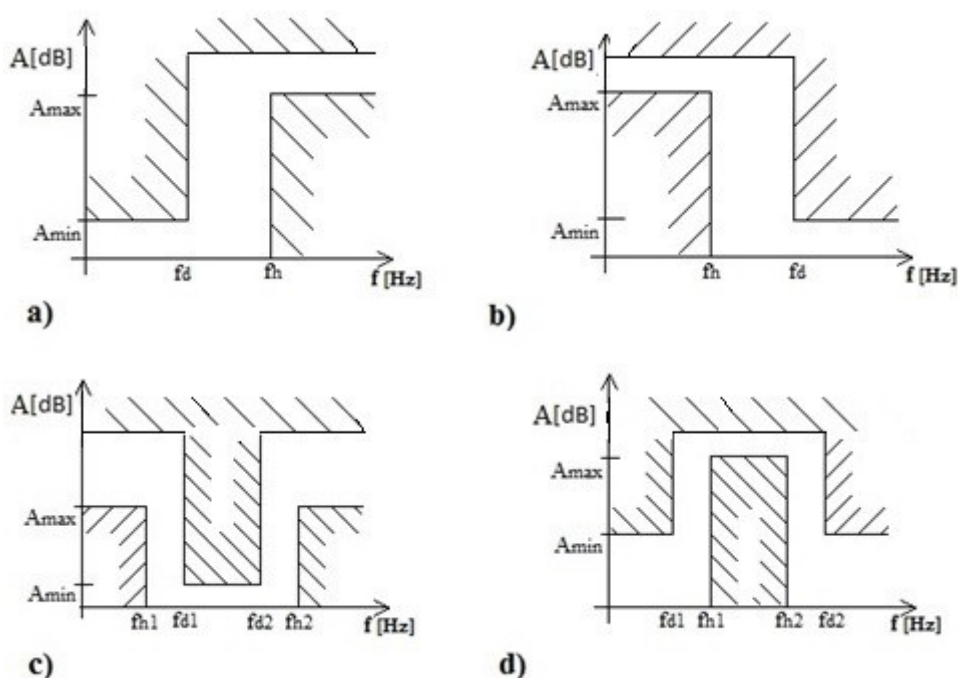
Mezi další nejčastěji používané aproximace patří:

- Besselova aproximace
- Cauerova aproximace
- Gaussova aproximace

## 2. Postup při návrh filtrů

### 2.1 Toleranční pole

Při návrhu filtru musíme nejprve v propustném pásmu definovat charakteristiku nerovnoměrnosti přípustného zvlnění. Tato hodnota odpovídá požadované přesnosti v propustném pásmu. Tímto vymezujeme toleranční pole viz. obrázek 2.1.1 a z hodnot musí vycházet modulová kmitočtová charakteristika, a tudíž v teoretické hladině by měla ležet uvnitř tolerančního pole a nepřesahovat ho. V obrázku 2.1.1 můžeme vidět za a) horní propust, b) dolní propust, c) pásmovou zadrž, d) pásmovou propust.



Obrázek 2.1.1 - Toleranční schémata

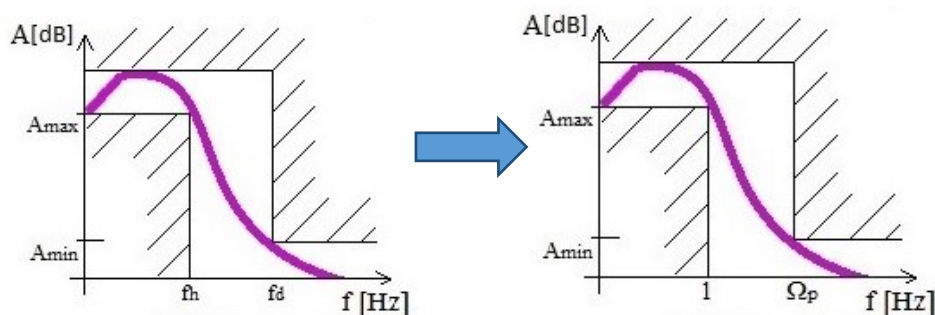
### 2.2. Kmitočtové transformace filtrů na normovanou dolní propust

Pro naše zadané toleranční pole je velmi obtížné nalézt přenosovou funkci a jedná se o obtížný výpočetní úkol. Práci si ulehčíme použitím standardizovaných aproximací mezních kmitočtů dolní propusti. Pro zpětné ověření při tvorbě filtru můžeme použít opačný postup a musí se nepodmínečně vejít zpět do tolerančního pole.

## 2.2.1 Transformace dolní propusti na normovanou dolní propust

Na obrázku 2.2.1.1 vidíme určení činitele selektivity  $\Omega_s$  převodem dolní propusti na normovanou dolní propust pomocí dělení kmitočtové osy zlomovým kmitočtem horní propusti popsané vztahem v rovnici (2.1), kde  $f$  představuje osu kmitočtu a  $f_h$  označuje zlomový kmitočet horní propusti.

Pro kmitočtové odnormování, ze kterého lze získat reálné hodnoty prvků a mezní kmitočet filtru využijeme vztah z rovnice (2.2)



Obrázek 2.2.1.1 - Transformace dolní propusti na normovanou dolní propust

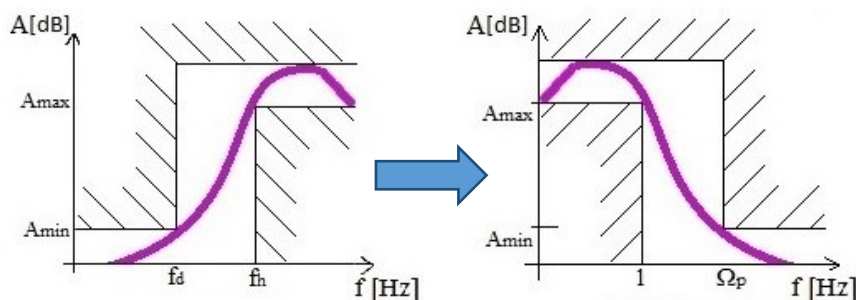
$$\Omega_s = \frac{f}{f_h} \Rightarrow \Omega_p = \frac{f_d}{f_h} \quad (2.1)$$

$$f = \Omega_s \cdot f_h \quad (2.2)$$

## 2.2.2 Transformace horní propusti na normovanou dolní propust

Z obrázku 2.2.2.1 je patrné, že při převodu horní propusti na normovanou dolní propust dochází k převratu kmitočtové osy kolem zlomového kmitočtu horní propusti. Tento vztah definuje rovnice (2.3)

Při odnormování dolní normované propusti na horní propust použijeme rovnici (2.4)



Obrázek 2.2.2.1 - Transformace horní propusti na normovanou dolní propust

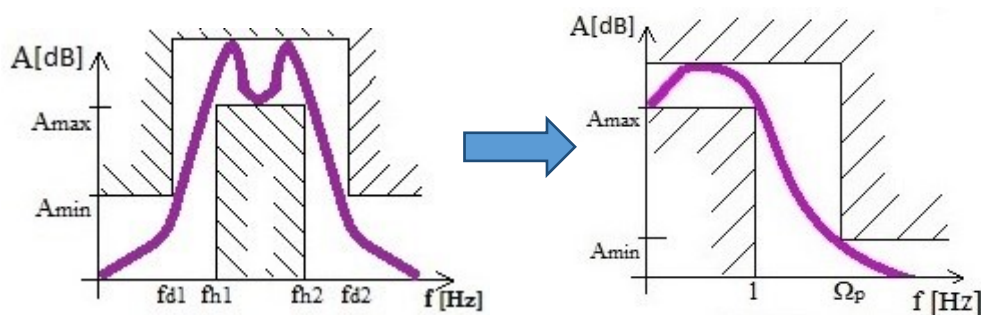
$$\Omega_s = \frac{f_h}{f} \Rightarrow \Omega_p = \frac{f_h}{f_d} \quad (2.3)$$

$$f = \frac{f_h}{\Omega_s} \quad (2.4)$$

## 2.2.3 Transformace pásmové propusti na normovanou dolní propust

Při převodu pásmové propusti na normovanou dolní propust, který lze vidět na obrázku 2.2.3.1, nejprve musíme vypočítat šířku pásma vyplývající z rovnice (2.5) a střední kmitočet filtru vycházející z rovnice (2.6). Poté můžeme vypočíst normovanou dolní propust pomocí rovnice (2.7).

K převodu dolní normované propusti na pásmovou propust použijeme rovnici (2.8)



Obrázek 2.2.3.1 - Transformace pásmové propusti na normovanou dolní propust

$$\Delta f = f_{h2} - f_{h1} \quad (2.5)$$

$$f_0 = \sqrt{f_{h1} \cdot f_{h2}} \quad (2.6)$$

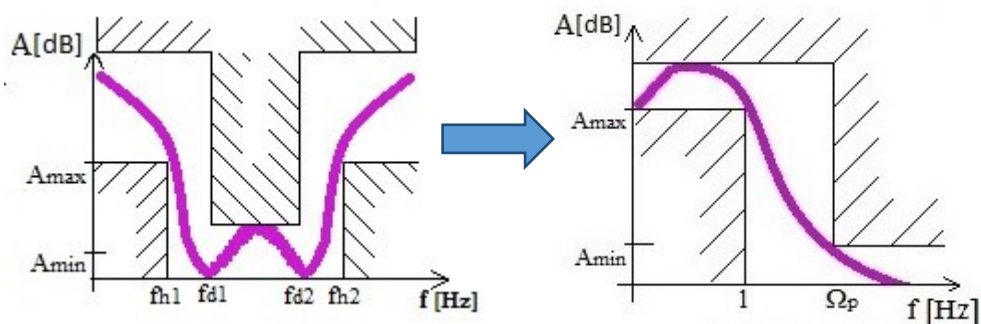
$$\Omega_s = \frac{|f^2 - f_0^2|}{f \cdot \Delta f} \Rightarrow \Omega_p = \frac{|f_d^2 - f_0^2|}{f_p \cdot \Delta f} \quad (2.7)$$

$$f = \sqrt{f_0^2 + \left(\frac{\Omega_s \cdot \Delta f}{2}\right)^2} \pm \frac{\Omega_s \cdot \Delta f}{2} \quad (2.8)$$

## 2.2.4 Transformace pásmové zádrže na normovanou dolní propust

Stejně jako u pásmové propusti, musíme u převodu pásmové zádrže na normovanou dolní propust popisující obrázek 2.2.4.1 nejprve vypočítat šířku pásma z rovnice (2.5) a střední kmitočet (2.6). Z těchto výpočtů můžeme dále pokračovat výpočtem na normovanou dolní propust popisující rovnicí (2.9).

Pásmovou zádrž získáme odnormováním dolní normované propusti pomocí rovnice (2.10).



Obrázek 2.2.4.1- Transformace pásmové zadržky na normovanou dolní propust

$$\Omega_s = \frac{f \cdot \Delta f}{|f^2 - f_0^2|} \Rightarrow \Omega_p = \frac{f_p \cdot \Delta f}{|f_p^2 - f_0^2|} \quad (2.9)$$

$$f = \sqrt{f_0^2 + \left(\frac{\Delta f}{2\Omega_s}\right)^2} \pm \frac{\Delta f}{2\Omega_s} \quad (2.10)$$

## 2.2.5 Výpočet n tého řádu filtru

Pro výpočet potřebného řádu filtru využijeme rovnici (2.11) pro aproximaci typu Butterworth, kde je maximální dovolená hodnota útlumu v propustném pásmu  $A_{\max}$  3dB.

$$n \geq \frac{\lg\left(\frac{\frac{A_{\min}}{10^{\frac{10}{10}} - 1}}{\frac{A_{\max}}{10^{\frac{10}{10}} - 1}}\right)}{2 \lg \Omega_s} \quad (2.11)$$

Řád filtru u aproximace typu Čebyšev a inverzní Čebyšev vychází z rovnice (2.12)

$$n \geq \frac{\arg \cosh \sqrt{\frac{\frac{A_{\min}}{10^{\frac{10}{10}} - 1}}{\frac{A_{\max}}{10^{\frac{10}{10}} - 1}}}}{\arg \cosh \Omega_s} \quad (2.12)$$

### 3. Návrh jednotlivých propustí

#### 3.1 Návrh Butterworthovy dolní propusti

Naším úkolem je navrhnout filtr pro dolní propust s Butterworthovou charakteristikou. Zlomový kmitočet činí  $f_h = 2$  kHz, hodnota útlumu v nepropustném pásmu je  $f = 8$  kHz, minimální požadovaná hodnota útlumu v nepropustném pásmu je  $A_{\min} = 40$  dB a zesílení je  $H_0 = 1$ .

Prvním krokem je aplikace rovnice (2.1), ze které vypočteme normovanou dolní propust. Pro  $\Omega$  vyjde

$$\Omega_s = \frac{f}{f_h} = 4 \quad (3.1.1)$$

Nyní můžeme vypočíst potřebný řád filtru  $n$  dle rovnice (2.11). Jako maximální dovolenou hodnotu útlumu v propustném pásmu jsme dosadili  $A_{\max} = 1$  dB.

$$n \geq \frac{\lg\left(\frac{\frac{A_{\min}}{10^{\frac{A_{\min}}{20}} - 1}}{\frac{A_{\max}}{10^{\frac{A_{\max}}{20}} - 1}}\right)}{2 \lg \Omega_s} = 3,81 \doteq 4 \quad (3.1.2)$$

Nyní tedy víme, že potřebujeme filtr 4. řádu. Ten lze vytvořit sloučením dvou filtrů 2. řádu. Zvolíme si invertující zapojení použitím struktury Bridgman – Brennan. Námi zadané zesílení rozložíme pro každou sekci stejnoměrně. To znamená  $H_{01} = H_{02} = -\sqrt{1}$ . Z tabulky č. 1 pro první sekci druhého řádu máme hodnoty  $a_1 = 1,8478$  a  $b_1 = 1,0000$ . Volíme si hodnoty kapacity  $C_1 = 10$  nF a  $C_2 = 130$  nF. Podmínka z rovnice (3.1.3) je tedy splněna.

$$\frac{C_2}{C_1} > \frac{4b_1(1-H_{01})}{a_1^2} = 2,35 \quad (3.1.3)$$

Pro rezistor  $R_2$  vybíráme operátor rozdílu, vypočteme tedy odpor  $R_2$ , díky kterému můžeme vypočíst hodnoty pro odpory  $R_1$  a  $R_3$ .

$$R_2 = \frac{a_1 C_2 - \sqrt{a_1^2 C_2^2 - 4b_1 C_1 C_2 (1-H_{01})}}{4\pi f_h C_1 C_2} = 695,45 \, \Omega \quad (3.1.4)$$

$$R_1 = \frac{-R_2}{H_{01}} = 695,45 \, \Omega \quad (3.1.5)$$

$$R_3 = \frac{b_1}{4\pi^2 f_h^2 C_1 C_2 R_2} = 7004,40 \, \Omega \quad (3.1.6)$$

Z tabulky č. 1 pro druhou sekci druhé řádu máme hodnoty  $a_1 = 0,7654$  a  $b_1 = 1,0000$ . Kapacitu volíme  $C_4 = 750 \, \text{nF}$  a  $C_3 = 10 \, \text{nF}$ , tudíž znovu splníme podmínku pro poměr kapacit z rovnice (3.1.7).

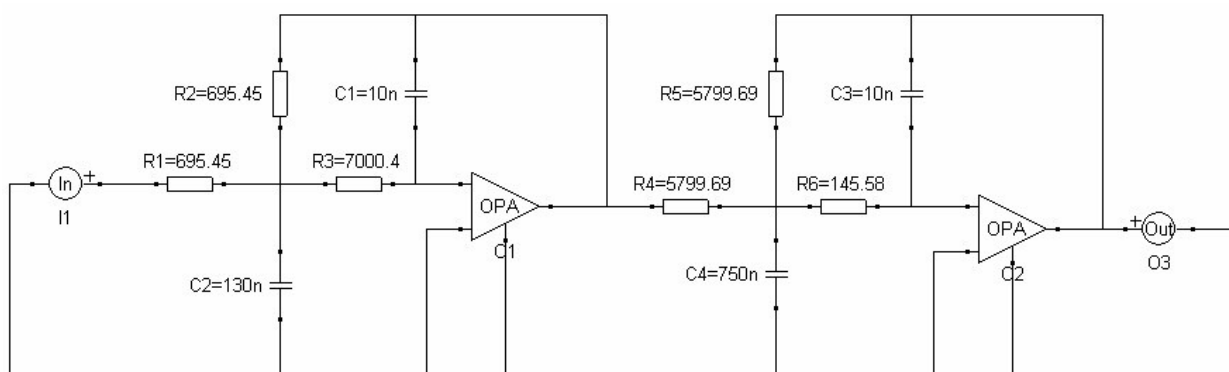
$$\frac{C_4}{C_3} > \frac{4b_1(1-H_{01})}{a_1^2} = 13,66 \quad (3.1.7)$$

Nyní jsme si vybrali operátor součtu pro rezistor  $R_5$ , pomocí kterého vypočteme rezistory  $R_4$  a  $R_6$ .

$$R_5 = \frac{a_1 C_4 + \sqrt{a_1^2 C_4^2 - 4b_1 C_3 C_4 (1-H_{02})}}{4\pi f_h C_3 C_4} = 5799,69 \, \Omega \quad (3.1.8)$$

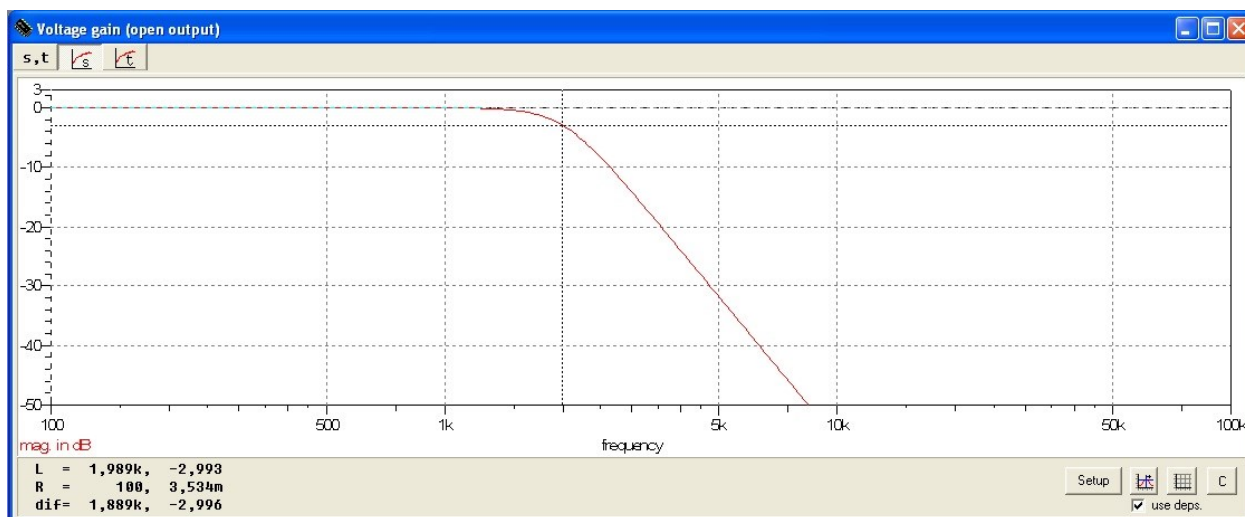
$$R_4 = \frac{-R_5}{H_{02}} = 5799,69 \, \Omega \quad (3.1.9)$$

$$R_6 = \frac{b_1}{4\pi^2 f_h^2 C_3 C_4 R_5} = 145,58 \, \Omega \quad (3.1.10)$$



Obrázek 3.1.1 - Dolní propust 4. řádu pro Butterworthův filtr





Obrázek 3.1.2 - Modulová kmitočtová charakteristika pro Butterworthovu dolní propust 4. řádu

### 3.2 Návrh Čebyševovy dolní propusti

Naším úkolem je navrhnout filtr pro dolní propust s Čebyševovou charakteristikou. Zlomový kmitočet činí  $f_h = 2$  kHz, hodnota útlumu v nepropustném pásmu je  $f = 8$  kHz, minimální požadovaná hodnota útlumu v nepropustném pásmu je  $A_{\min} = 40$  dB a zesílení je  $H_0 = 1$ .

Prvním krokem je aplikace rovnice (2.1), ze které vypočteme normovanou dolní propust. Pro  $\Omega$  vyjde

$$\Omega_s = \frac{f}{f_h} = 4 \quad (3.2.1)$$

Nyní můžeme vypočíst potřebný řád filtru  $n$  dle rovnice (2.12). Jako maximální dovolenou hodnotu útlumu v propustném pásmu jsme dosadili  $A_{\max} = 1$  dB.

$$n \geq \frac{\arg \cosh \sqrt{\frac{A_{\min}}{10^{\frac{A_{\max}}{10}} - 1}}}{\arg \cosh \Omega_s} = 2,89 \doteq 3 \quad (3.2.2)$$

Nyní tedy víme, že potřebujeme filtr 3. řádu. Ten lze vytvořit sloučením dvou filtrů 1. a 2. řádu. Zvolíme si invertující zapojení použitím struktury Bridgman – Brennan. Námi zadané zesílení rozložíme pro každou sekci stejnoměrně. To znamená  $H_{01} = H_{02} = -\sqrt{1}$ . Z tabulky č. 2 pro první sekci třetího řádu máme hodnoty  $a_1 = 2,2156$  a  $b_1 = 0,0000$ . Volíme si hodnotu kapacity  $C_1 = 100$  nF. Odpory  $R_1$  a  $R_2$  pro první sekci třetího řádu vyjdou podle rovnic (3.2.3) a (3.2.4).

$$R_2 = \frac{a_1}{2\pi f_h C_1} = 1763,12 \, \Omega \quad (3.2.3)$$

$$R_1 = -\frac{R_2}{H_0} = 1763,12 \, \Omega \quad (3.2.4)$$

Z tabulky č. 2 pro druhou sekci třetího řádu máme hodnoty  $a_1 = 0,5442$  a  $b_1 = 1,2057$ . Kapacitu volíme  $C_3 = 200 \, \text{nF}$  a  $C_2 = 4 \, \text{nF}$ , tudíž znovu splníme podmínku pro poměr kapacit z rovnice (3.2.5).

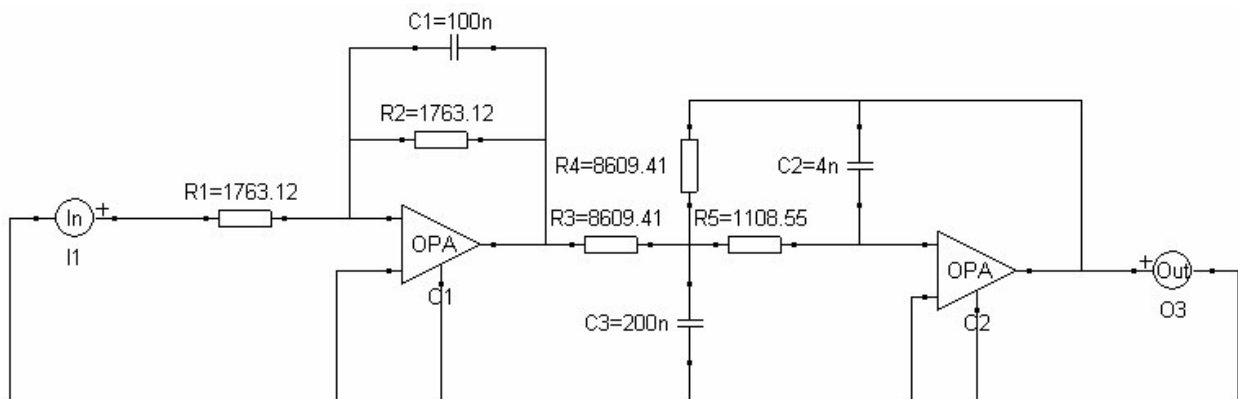
$$\frac{C_3}{C_2} > \frac{4b_1(1-H_{01})}{a_1^2} = 32,57 \quad (3.2.5)$$

Odpory tedy vyjdou pro druhou sekci třetího řádu jako  $R_3$ ,  $R_4$  a  $R_5$

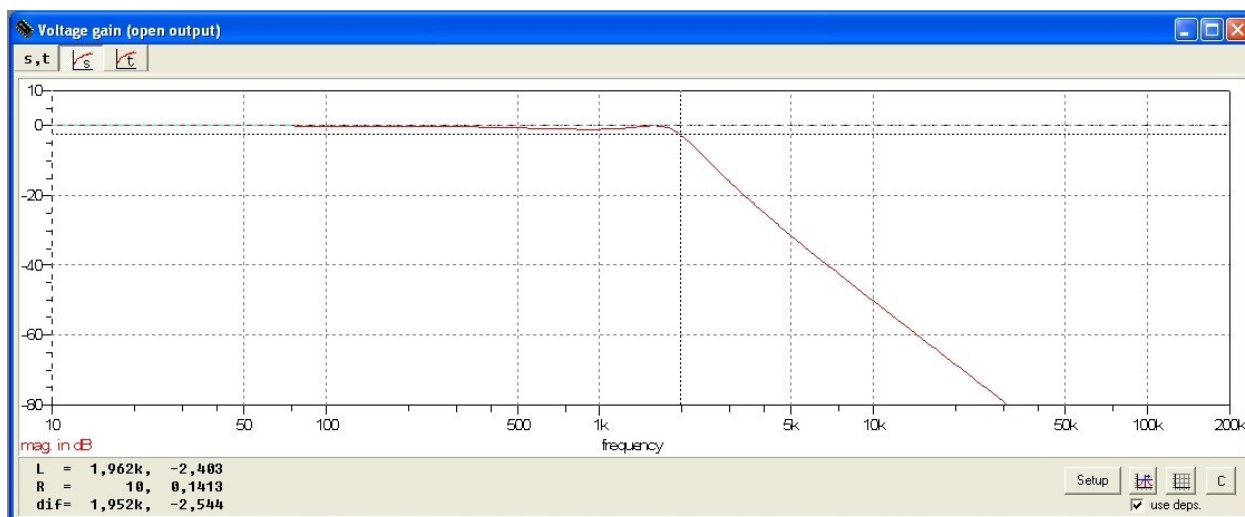
$$R_4 = \frac{a_1 C_3 - \sqrt{a_1^2 C_3^2 - 4b_1 C_2 C_3 (1-H_{01})}}{4\pi f_h C_2 C_3} = 8609,41 \, \Omega \quad (3.2.6)$$

$$R_3 = \frac{-R_4}{H_{01}} = 8609,41 \, \Omega \quad (3.2.7)$$

$$R_5 = \frac{b_1}{4\pi^2 f_h^2 C_2 C_3 R_4} = 1108,55 \, \Omega \quad (3.2.8)$$



Obrázek 3.2.1 - Dolní propust 3. řádu pro Čebyševův filtr



Obrázek 3.2.2 - Modulová kmitočtová charakteristika pro Čebyševovu dolní propust 3. řádu

### 3.3 Návrh Butterworthovy horní propusti

Naším úkolem je navrhnout filtr pro horní propust s Butterworthovou charakteristikou. Zlomový kmitočet činí  $f_h = 300$  Hz, hodnota útlumu v nepropustném pásmu je  $f = 80$  Hz, minimální požadovaná hodnota útlumu v nepropustném pásmu je  $A_{\min} = 40$  dB a zesílení je  $H_0 = 1$ .

Prvním krokem je aplikace rovnice (2.3), ze které vypočteme normovanou dolní propust. Pro  $\Omega$  vyjde

$$\Omega_s = \frac{f_h}{f} = 3,75 \quad (3.3.1)$$

Nyní můžeme vypočíst potřebný řád filtru  $n$  dle rovnice (2.11). Jako maximální dovolenou hodnotu útlumu v propustném pásmu jsme dosadili  $A_{\max} = 1$  dB.

$$n \geq \frac{\lg\left(\frac{\frac{A_{\min}}{10^{\frac{A_{\max}}{20}} - 1}}{\frac{A_{\max}}{10^{\frac{A_{\max}}{20}} - 1}}\right)}{2 \lg \Omega_s} = 3,99 \doteq 4 \quad (3.3.2)$$

Nyní tedy víme, že potřebujeme filtr 4. řádu. Ten lze vytvořit sloučením dvou filtrů 2. řádu. Zvolíme si invertující zapojení použitím struktury Bridgman – Brennan. Námi zadané zesílení rozložíme pro každou sekci stejnoměrně. To znamená  $H_{01} = H_{02} = -\sqrt{1}$ . Z tabulky č. 1 pro první sekci druhého řádu máme hodnoty  $a_1 = 1,8478$  a  $b_1 = 1,0000$ . Volíme si hodnotu kapacity  $C = C_1 = C_2 = 100$  nF.

$$C_3 = -\frac{C}{H_\infty} = 100 \text{ nF} \quad (3.3.3)$$

$$R_2 = \frac{2C+C_3}{2\pi f_h a_1 C C_3} = 8613,21 \, \Omega \quad (3.3.4)$$

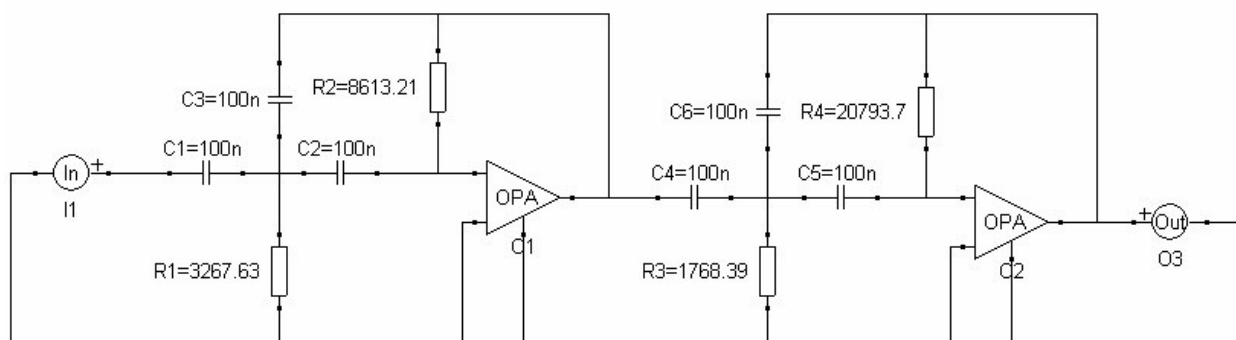
$$R_1 = \frac{1}{4\pi^2 f_h^2 b_1 C C_3 R_2} = 3267,63 \, \Omega \quad (3.3.5)$$

Pro druhou sekci výpočtu použijeme kapacity s hodnotami  $C = C_4 = C_5 = 100 \text{ nF}$ . Z tabulky č. 1 pro druhou sekci druhého řádu máme hodnoty  $a_1 = 0,7654$  a  $b_1 = 1,0000$ .

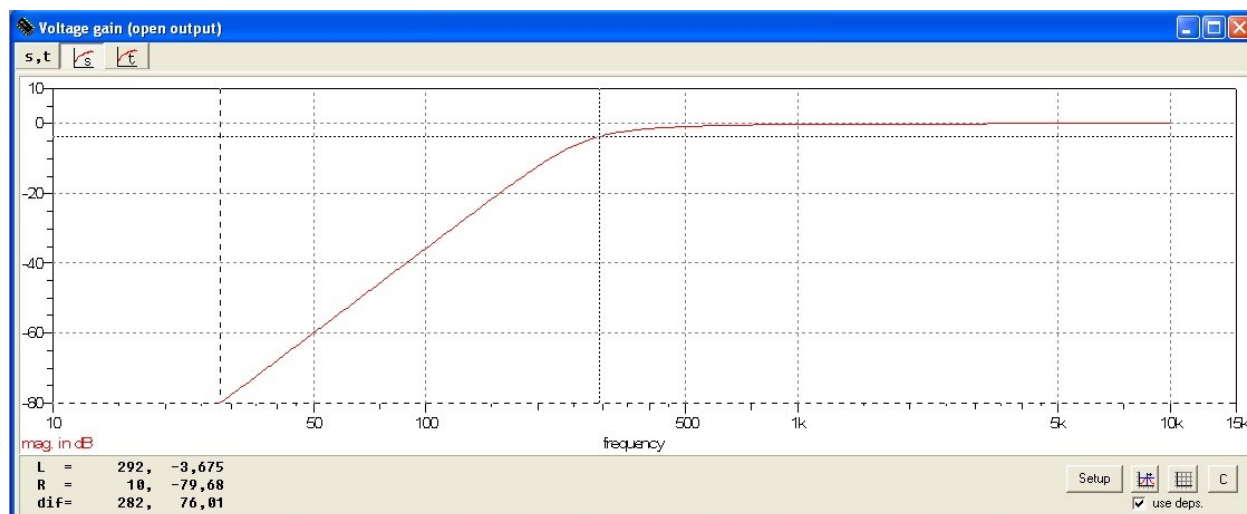
$$C_6 = -\frac{C}{H_\infty} = 100 \text{ nF} \quad (3.3.6)$$

$$R_4 = \frac{2C+C_6}{2\pi f_h a_1 C C_6} = 20793,7 \, \Omega \quad (3.3.7)$$

$$R_3 = \frac{1}{4\pi^2 f_h^2 b_1 C C_6 R_4} = 1768,39 \, \Omega \quad (3.3.8)$$



Obrázek 3.3.1 - Horní propust 4. řádu pro Butterworthův filtr



Obrázek 3.3.2 - Modulová kmitočtová charakteristika pro Butterworthovu horní propust 4. řádu

### 3.4 Návrh Čebyševovy horní propusti

Naším úkolem je navrhnout filtr pro horní propust s Čebyševovou charakteristikou. Zlomový kmitočet činí  $f_h = 300$  Hz, hodnota útlumu v nepropustném pásmu je  $f = 80$  Hz, minimální požadovaná hodnota útlumu v nepropustném pásmu je  $A_{\min} = 40$  dB a zesílení je  $H_0 = 1$ .

Prvním krokem je aplikace rovnice (2.3), ze které vypočteme normovanou dolní propust. Pro  $\Omega$  vyjde

$$\Omega_s = \frac{f_h}{f} = 3,75 \quad (3.4.1)$$

Nyní můžeme vypočíst potřebný řád filtru  $n$  dle rovnice (2.12). Jako maximální dovolenou hodnotu útlumu v propustném pásmu jsme dosadili  $A_{\max} = 1$  dB.

$$n \geq \frac{\arg \cosh \sqrt{\frac{\frac{A_{\min}}{10^{\frac{A_{\min}}{10}} - 1}}{\frac{A_{\max}}{10^{\frac{A_{\max}}{10}} - 1}}}}{\arg \cosh \Omega_s} = 2,99 \doteq 3 \quad (3.4.2)$$

Nyní tedy víme, že potřebujeme filtr 3. řádu. Ten lze vytvořit sloučením dvou filtrů 1. a 2. řádu. Zvolíme si invertující zapojení použitím struktury Bridgman – Brennan. Námi zadané zesílení rozložíme pro každou sekci stejnoměrně. To znamená  $H_{01} = H_{02} = -\sqrt{1}$ . Z tabulky č. 2 pro první sekci třetího řádu máme hodnoty  $a_1 = 2,2156$  a  $b_1 = 0,0000$ . Volíme si hodnotu kapacity  $C_1 = 100$  nF. Odpory  $R_1$  a  $R_2$  pro první sekci třetího řádu vyjdou podle rovnic (3.4.3) a (3.4.4).

$$R_1 = \frac{1}{2\pi f_h a_1 C_1} = 2394,46 \, \Omega \quad (3.4.3)$$

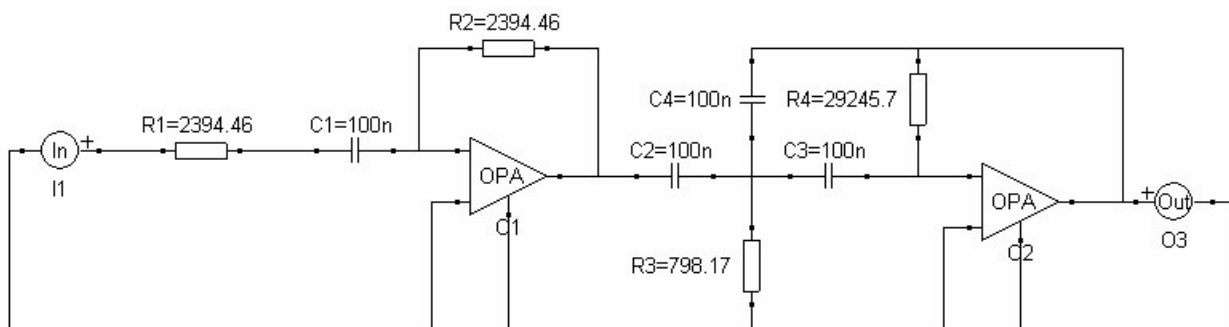
$$R_2 = -R_1 H_\infty = 2394,46 \, \Omega \quad (3.4.4)$$

Z tabulky č. 2 pro druhou sekci třetího řádu máme hodnoty  $a_1 = 0,5442$  a  $b_1 = 1,2057$ . Kapacitu volíme  $C = C_2 = C_3 = 100$  nF.

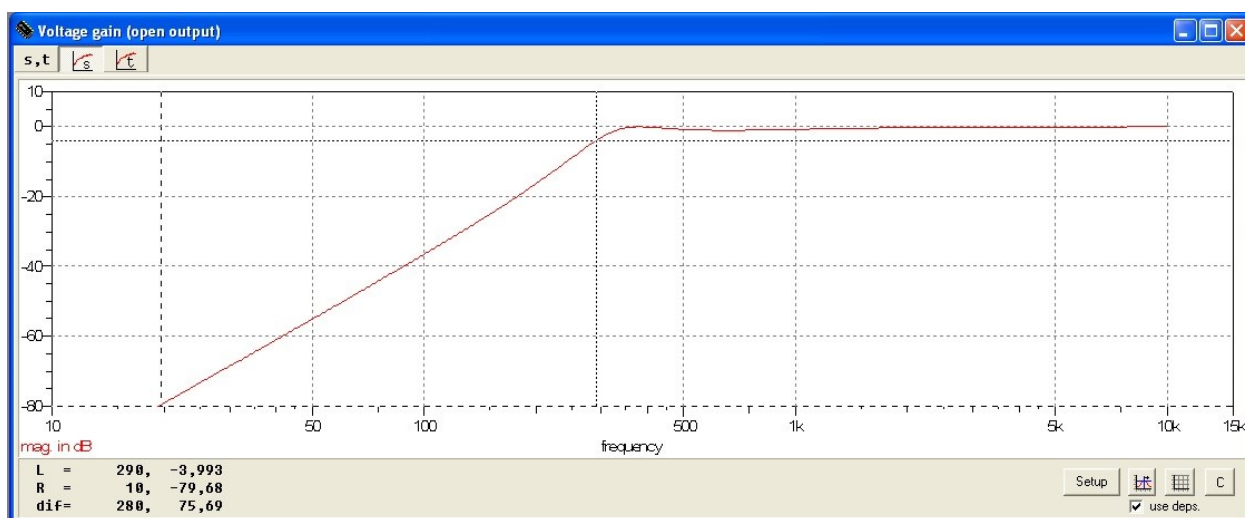
$$C_4 = -\frac{C}{H_\infty} = 100 \, nF \quad (3.4.5)$$

$$R_4 = \frac{2C + C_4}{2\pi f_h a_1 C C_4} = 29245,7 \, \Omega \quad (3.4.6)$$

$$R_3 = \frac{1}{4\pi^2 f_h^2 b_1 C C_4 R_4} = 798,17 \, \Omega \quad (3.4.7)$$



Obrázek 3.4.1 - Horní propust 3. řádu pro Čebyševův filtr



Obrázek 3.4.2 - Modulová kmitočtová charakteristika pro Čebyševovu horní propust 3. řádu

### 3.5 Návrh Butterworthovy širokopásmové pásmové propusti

Naším úkolem je navrhnout filtr pro širokopásmovou pásmovou propust s Butterworthovou charakteristikou. Zlomové kmitočty propustného pásma činí  $f_{h1} = 400$  Hz a  $f_{h2} = 3500$  Hz. Hodnota přenosu je  $H_{\infty} = 1$ .

Prvním krokem je výpočet středového kmitočtu  $f_0$

$$f_0 = \sqrt{f_{h1} \cdot f_{h2}} = 1183,22 \quad (3.5.1)$$

Poměrná šířka pásma je  $\Delta\omega_n$

$$\Delta\omega_n = \frac{2\pi\Delta(f_{h2}-f_{h1})}{2\pi f_0} = 2,62 \quad (3.5.2)$$

Protože  $\Delta\omega_n > 2$  jde o širokopásmovou pásmovou propust a takový filtr je vhodný navrhnout jako kaskádu horní propusti a dolní propusti 2. řádu. Pro Butterworthovu normovanou dolní propust 2. řádu jsou koeficienty  $a_1 = 1,4142$ ,  $b_1 = 1,0000$  přenosové funkce podle tabulky č. 1.[3]

Pro horní propust 2. řádu volíme kapacity  $C = C_1 = C_2 = 100 \text{ nF}$ .

$$C_3 = -\frac{C}{H_\infty} = 100 \text{ nF} \quad (3.5.3)$$

$$R_2 = \frac{2C+C_3}{2\pi f_{h1}a_1CC_3} = 8440,55 \, \Omega \quad (3.5.4)$$

$$R_1 = \frac{1}{4\pi^2 f_{h1}^2 b_1 CC_3 R_2} = 1875,64 \, \Omega \quad (3.5.5)$$

Pro dolní propust 2. řádu volíme kapacity  $C_4 = 10 \text{ nF}$  a  $C_5 = 100 \text{ nF}$ , čímž je splněna podmínka z rovnice (3.5.6).

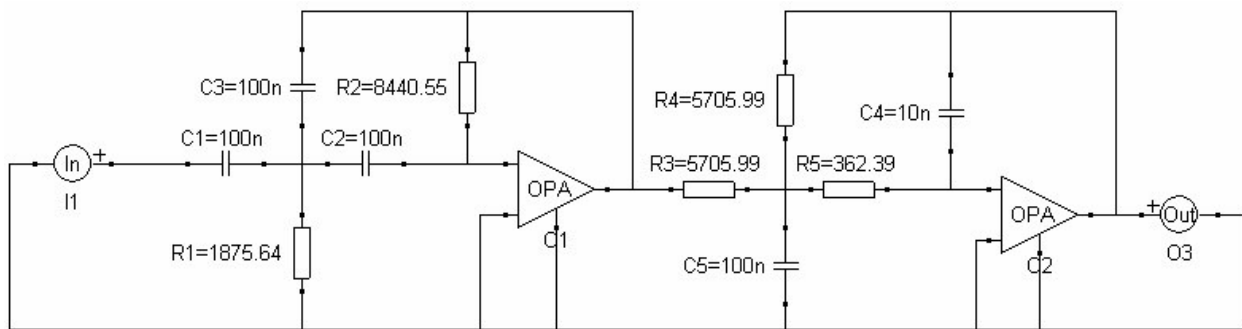
$$\frac{C_5}{C_4} > \frac{4b_1(1-H_{01})}{a_1^2} = 4,00 \quad (3.5.6)$$

Pro rezistor  $R_4$  vybíráme operátor součtu, vypočteme tedy odpor  $R_4$ , díky kterému můžeme vypočítat hodnoty pro odpory  $R_3$  a  $R_5$ .

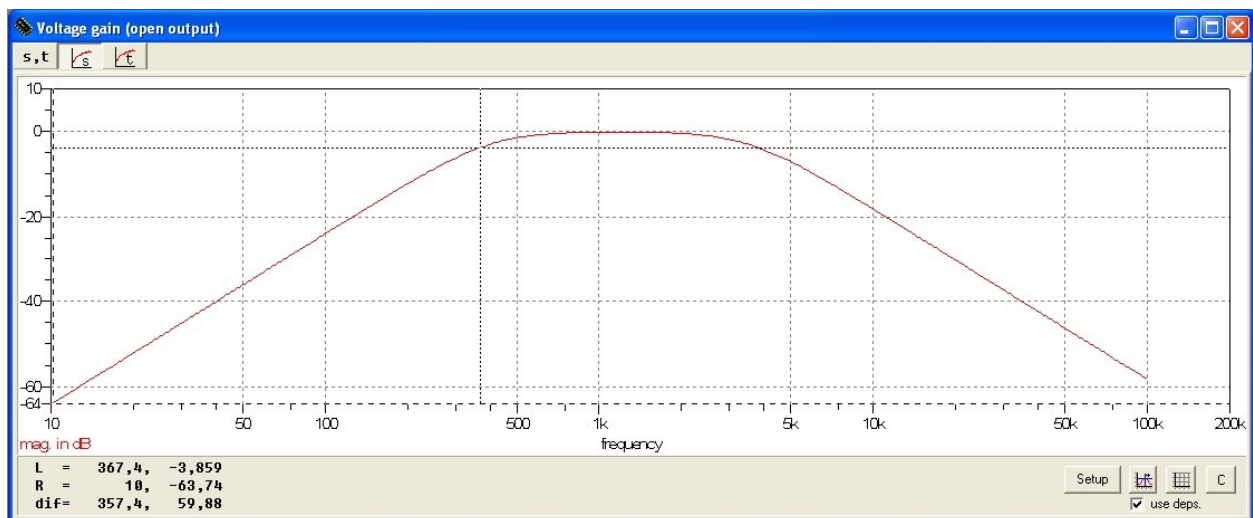
$$R_4 = \frac{a_1 C_5 + \sqrt{a_1^2 C_5^2 - 4b_1 C_4 C_5 (1-H_{01})}}{4\pi f_{h2} C_4 C_5} = 5705,99 \, \Omega \quad (3.5.7)$$

$$R_3 = \frac{-R_4}{H_{01}} = 5705,99 \, \Omega \quad (3.5.8)$$

$$R_5 = \frac{b_1}{4\pi^2 f_{h2}^2 C_4 C_5 R_4} = 362,39 \, \Omega \quad (3.5.9)$$



Obrázek 3.5.1 - Širokopásmová pásmová propust 4. řádu pro Butterworthův filtr



Obrázek 3.5.2 - Modulová kmitočtová charakteristika pro Butterworthovu širokopásmovou pásmovou propust 4. řádu

### 3.6 Návrh Čebyševovy širokopásmové pásmové propusti

Nášim úkolem je navrhnout filtr pro širokopásmovou pásmovou propust s Čebyševovou charakteristikou. Zlomové kmitočty propustného pásma činí  $f_{h1} = 400$  Hz a  $f_{h2} = 3500$  Hz. Hodnota přenosu je  $H_{\infty} = 1$ .

Prvním krokem je výpočet středového kmitočtu  $f_0$

$$f_0 = \sqrt{f_{h1} \cdot f_{h2}} = 1183,22 \quad (3.6.1)$$



Poměrná šířka pásma je  $\Delta\omega_n$

$$\Delta\omega_n = \frac{2\pi\Delta(f_{h2}-f_{h1})}{2\pi f_0} = 2,62 \quad (3.6.2)$$

Protože  $\Delta\omega_n > 2$  jde o širokopásmovou pásmovou propust a takový filtr je vhodný navrhnout jako kaskádu horní propusti a dolní propusti 2. řádu. Pro Čebyševovu normovanou dolní propust 2. řádu jsou koeficienty  $a_1 = 1,0650$ ,  $b_1 = 1,9305$  přenosové funkce podle tabulky č. 2.

Pro horní propust 2. řádu volíme kapacity  $C = C_1 = C_2 = 100 \text{ nF}$

$$C_3 = -\frac{C}{H_\infty} = 100 \text{ nF} \quad (3.6.3)$$

$$R_2 = \frac{2C+C_3}{2\pi f_{h1}a_1CC_3} = 11\,208,1 \, \Omega \quad (3.6.4)$$

$$R_1 = \frac{1}{4\pi^2 f_{h1}^2 b_1 CC_3 R_2} = 731,68 \, \Omega \quad (3.6.5)$$

Pro dolní propust 2. řádu volíme kapacity  $C_4 = 10 \text{ nF}$  a  $C_5 = 100 \text{ nF}$ , čímž je splněna podmínka z rovnice (3.6.6).

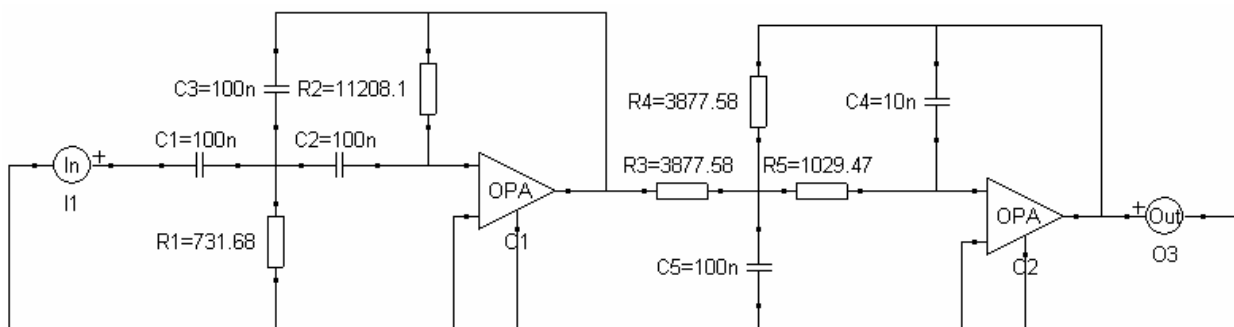
$$\frac{C_5}{C_4} > \frac{4b_1(1-H_{01})}{a_1^2} = 7,32 \quad (3.6.6)$$

Pro rezistor  $R_4$  vybíráme operátor rozdíl, vypočteme tedy odpor  $R_4$ , díky kterému můžeme vypočítat hodnoty pro odpory  $R_3$  a  $R_5$ .

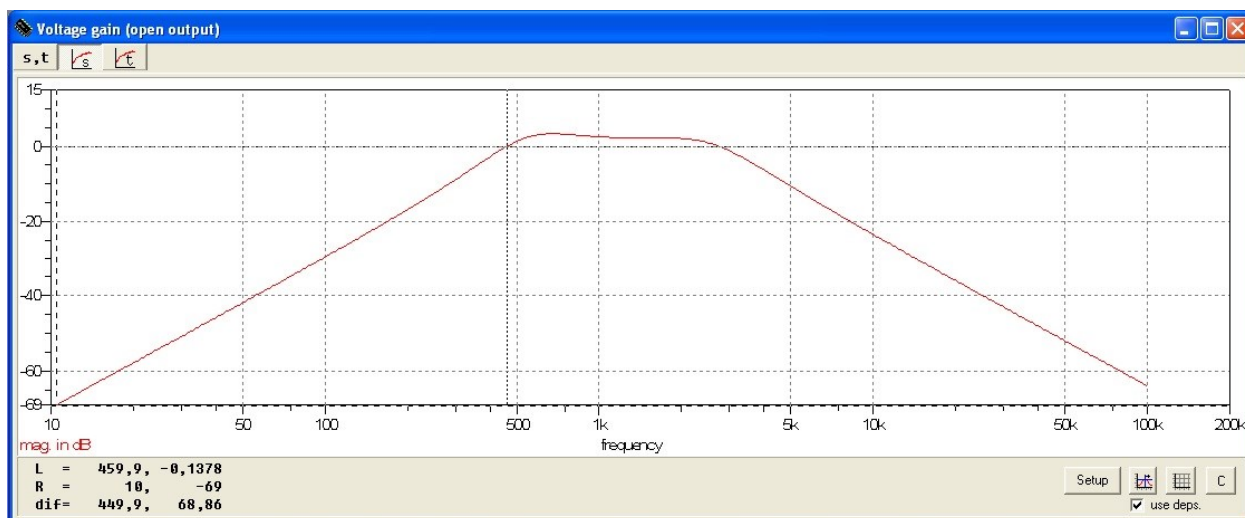
$$R_4 = \frac{a_1 C_5 - \sqrt{a_1^2 C_5^2 - 4b_1 C_4 C_5 (1-H_{01})}}{4\pi f_{h2} C_4 C_5} = 3\,877,58 \, \Omega \quad (3.6.7)$$

$$R_3 = \frac{-R_4}{H_{01}} = 3\,877,58 \, \Omega \quad (3.6.8)$$

$$R_5 = \frac{b_1}{4\pi^2 f_{h2}^2 C_4 C_5 R_4} = 1\,029,47 \, \Omega \quad (3.6.9)$$



Obrázek 3.6.1 - Širokopásmová pásmová propust 4. řádu pro Čebyševův filtr



Obrázek 3.6.2 – Modulová kmitočtová charakteristika pro Čebyševovu širokopásmovou pásmovou propust 4. řádu

### 3.7 Návrh Butterworthovy úzkopásmové pásmové propusti

Nášim úkolem je navrhnout filtr pro úzkopásmovou pásmovou propust s Butterworthovou charakteristikou. Zlomové kmitočty propustného pásma činí  $f_d = 500$  Hz a  $f_h = 900$  Hz. Hodnota přenosu je  $H_0 = 1$  a zvlnění v propustném pásmu je  $A_{\max} = 3$  dB. Pro pásmové propusti volíme kapacity  $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = C = 100$  nF.

Prvním krokem je výpočet středového kmitočtu  $f_0$

$$f_0 = \sqrt{f_d \cdot f_h} = 670,82 \quad (3.7.1)$$

Poměrná šířka pásma je  $\Delta\omega_n$

$$\Delta\omega_n = \frac{2\pi\Delta(f_h - f_d)}{2\pi f_0} = 0,59 \quad (3.7.2)$$

Protože  $\Delta\omega_n < 2$  tak filtr navrhujeme jako kaskádu dvou pásmových propustí 2. řádu. Pro Butterworthovu normovanou dolní propust 2. řádu jsou koeficienty  $a_1 = 1,4142$  a  $b_1 = 1,0000$  přenosové funkce podle tabulky č. 1.

$$\alpha^8 - \frac{\Delta\omega_n^2}{b_1}\alpha^6 + \left[\left(\frac{\Delta\omega_n a_1}{b_1}\right)^2 - 2 - \frac{2\Delta\omega_n^2}{b_1}\right]\alpha^4 - \frac{\Delta\omega_n^2}{b_1}\alpha^2 + 1 = 0 \quad (3.7.3)$$

Po dosazení do algebraické rovnice (3.7.3) dostaneme tvar rovnice (3.7.4) Rovnice má 4 reálné a 4 komplexní kořeny. Řešením jsou pouze kladné reálné kořeny. Jedním z nich je  $\alpha = 1,23826$ . Rovnice je reciproká a nezáleží na tom, které řešení uvažujeme.

$$\alpha^8 - 0,355216\alpha^6 - 2,00001\alpha^4 - 0,355216\alpha^2 + 1 = 0 \quad (3.7.4)$$

Nyní vypočteme přenos  $H_1$ , činitel jakosti  $Q_1$  a středové kmitočty  $f_{01}$  a  $f_{02}$ .

$$Q_1 = \frac{b_1(1+\alpha^2)}{\alpha\Delta\omega_n a_1} = 2,4519 \quad (3.7.5)$$

$$H_1 = Q_1\Delta\omega_n\sqrt{\frac{H_0}{b_1}} = 1,4466 \quad (3.7.6)$$

$$f_{01} = \frac{f_0}{\alpha} = 542 \text{ Hz} \quad (3.7.7)$$

$$f_{02} = \alpha f_0 = 831 \text{ Hz} \quad (3.7.8)$$

Pro výpočty rezistorů jsme si zvolili invertující zapojení Bridgman-Brennan.  $H_1$  musíme dosadit s mínusem, protože jde o invertující zapojení a hodnoty rezistorů musí být kladné.

$$R_1 = -\frac{Q_1}{2\pi f_{01} H_1 C} = 4977,09 \Omega \quad (3.7.9)$$

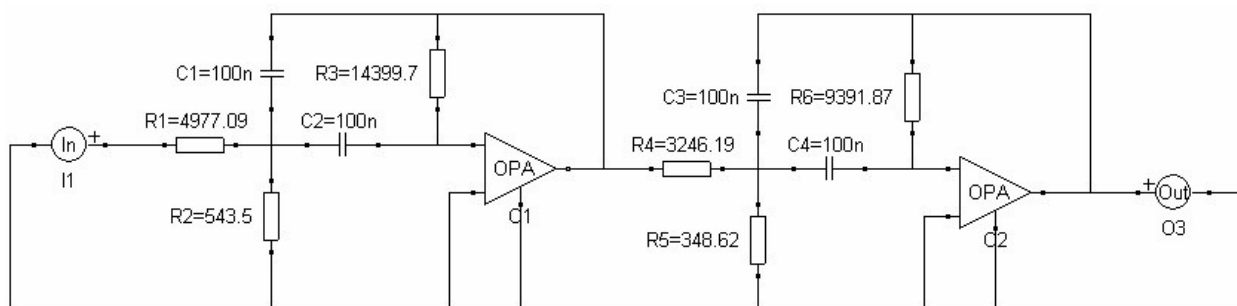
$$R_2 = \frac{Q_1}{2\pi f_{01} C(2Q_1^2 + H_1)} = 534,50 \Omega \quad (3.7.10)$$

$$R_3 = \frac{Q_1}{\pi f_{01} C} = 14399,7 \, \Omega \quad (3.7.11)$$

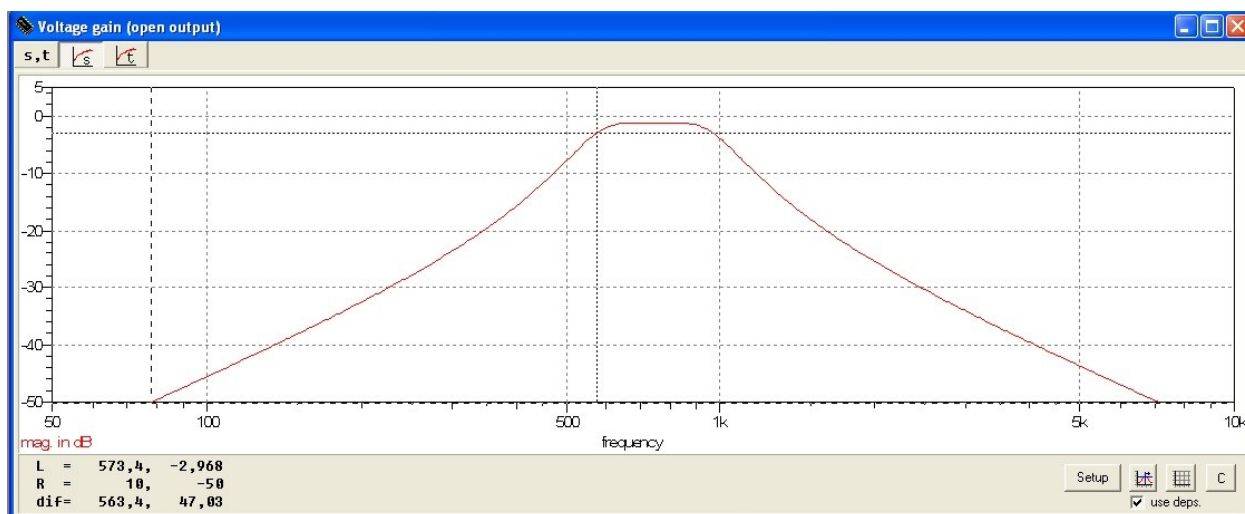
$$R_4 = -\frac{Q_1}{2\pi f_{02} H_1 C} = 3246,19 \, \Omega \quad (3.7.12)$$

$$R_5 = \frac{Q_1}{2\pi f_{02} C(2Q_1^2 + H_1)} = 348,62 \, \Omega \quad (3.7.13)$$

$$R_6 = \frac{Q_1}{\pi f_{02} C} = 9391,87 \, \Omega \quad (3.7.14)$$



Obrázek 3.7.1 - Úzkopásmová pásmová propust 4. řádu pro Butterworthův filtr



Obrázek 3.7.2 - Modulová kmitočtová charakteristika pro Butterworthovu úzkopásmovou pásmovou propust 4. řádu

### 3.8 Návrh Čebyševovy úzkopásmové pásmové propusti

Naším úkolem je navrhnout filtr pro úzkopásmovou pásmovou propust s Butterworthovou charakteristikou. Zlomové kmitočty propustného pásma činí  $f_d = 500$  Hz a  $f_h = 900$  Hz. Hodnota přenosu je  $H_0 = 1$  a zvlnění v propustném pásmu je  $A_{\max} = 3$  dB. Pro pásmové propusti volíme kapacity  $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = C = 100$  nF.

Prvním krokem je výpočet středového kmitočtu  $f_0$

$$f_0 = \sqrt{f_d \cdot f_h} = 670,82 \quad (3.8.1)$$

Poměrná šířka pásma je  $\Delta\omega_n$

$$\Delta\omega_n = \frac{2\pi\Delta(f_h - f_d)}{2\pi f_0} = 0,59 \quad (3.8.2)$$

Protože  $\Delta\omega_n < 2$  tak filtr navrhujeme jako kaskádu dvou pásmových propustí 2. řádu. Pro Butterworthovu normovanou dolní propust 2. řádu jsou koeficienty  $a_1 = 1,0650$  a  $b_1 = 1,9305$  přenosové funkce podle tabulky č. 1.

$$\alpha^8 - \frac{\Delta\omega_n^2}{b_1} \alpha^6 + \left[ \left( \frac{\Delta\omega_n a_1}{b_1} \right)^2 - 2 - \frac{2\Delta\omega_n^2}{b_1} \right] \alpha^4 - \frac{\Delta\omega_n^2}{b_1} \alpha^2 + 1 = 0 \quad (3.8.3)$$

Po dosazení do algebraické rovnice (3.8.3) dostaneme tvar rovnice (3.8.4) Rovnice má 4 reálné a 4 komplexní kořeny. Řešením jsou pouze kladné reálné kořeny. Jedním z nich je  $\alpha = 1,2159$ . Rovnice je reciproká a nezáleží na tom, které řešení uvažujeme.

$$\alpha^8 - 0,180316\alpha^6 - 2,25469\alpha^4 - 0,180316\alpha^2 + 1 = 0 \quad (3.8.4)$$

Nyní vypočteme přenos  $H_1$ , činitel jakosti  $Q_1$  a středové kmitočty  $f_{01}$  a  $f_{02}$ .

$$Q_1 = \frac{b_1(1+\alpha^2)}{\alpha\Delta\omega_n a_1} = 6,2624 \quad (3.8.5)$$

$$H_1 = Q_1 \Delta\omega_n \sqrt{\frac{H_0}{b_1}} = 2,6592 \quad (3.8.6)$$

$$f_{01} = \frac{f_0}{\alpha} = 552 \text{ Hz} \quad (3.8.7)$$

$$f_{02} = \alpha f_0 = 816 \text{ Hz} \quad (3.8.8)$$

Pro výpočty rezistorů jsme si zvolili invertující zapojení Bridgman-Brennan.  $H_1$  musíme dosadit s mínusem, protože jde o invertující zapojení a hodnoty rezistorů musí být kladné.

$$R_1 = -\frac{Q_1}{2\pi f_{01}H_1C} = 6790,02 \, \Omega \quad (3.8.9)$$

$$R_2 = \frac{Q_1}{2\pi f_{01}C(2Q_1^2+H_1)} = 222,65 \, \Omega \quad (3.8.10)$$

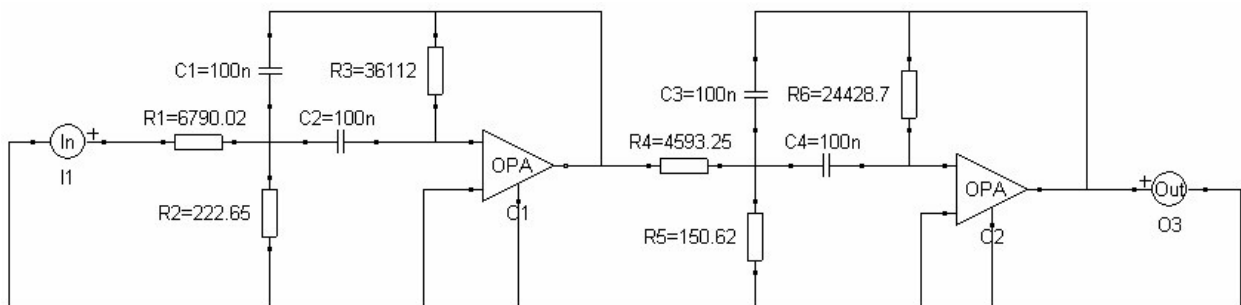
$$R_3 = \frac{Q_1}{\pi f_{01}C} = 36112 \, \Omega \quad (3.8.11)$$

$$R_4 = -\frac{Q_1}{2\pi f_{02}H_1C} = 4593,25 \, \Omega \quad (3.8.12)$$

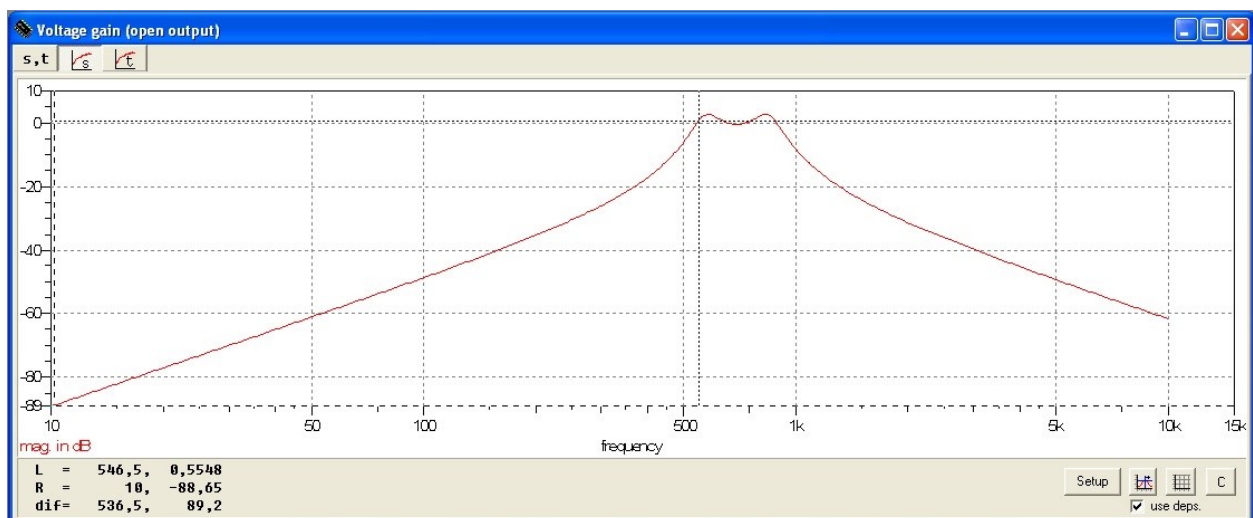
$$R_5 = \frac{Q_1}{2\pi f_{02}C(2Q_1^2+H_1)} = 150,62 \, \Omega \quad (3.8.13)$$

$$R_6 = \frac{Q_1}{\pi f_{02}C} = 24428,7 \, \Omega \quad (3.8.14)$$

Vzorce byly použity ze zdrojů [1], [2], [3], [4].



Obrázek 3.8.1 - Úzkopásmová pásmová propust 4. řádu pro Čebyševův filtr



Obrázek 3.8.2 - Modulová kmitočtová charakteristika pro Čebyševovu úzkopásmovou pásmovou propust 4. řádu

$H(p) = \prod_{i=1}^k \frac{1}{b_i p^2 + a_i p + 1}$			
<i>řád</i>	<i>sekce</i>	<i>Butterworth</i>	
<i>n</i>	<i>i</i>	<i>a<sub>i</sub></i>	<i>b<sub>i</sub></i>
2	1	1,4142	1,0000
3	1	1,0000	0,0000
	2	1,0000	1,0000
4	1	1,8478	1,0000
	2	0,7654	1,0000
5	1	1,0000	0,0000
	2	1,6180	1,0000
	3	0,6180	1,0000
6	1	1,9319	1,0000
	2	1,4142	1,0000
	3	0,5176	1,0000
7	1	1,0000	0,0000
	2	1,8019	1,0000
	3	1,2470	1,000
	4	0,4450	1,0000
8	1	1,9616	1,0000
	2	1,6629	1,0000
	3	1,1111	1,0000
	4	0,3902	1,0000
9	1	1,0000	0,0000
	2	1,8794	1,0000
	3	1,5321	1,0000
	4	1,0000	1,0000
	5	0,3473	1,0000
10	1	1,9754	1,0000
	2	1,7820	1,0000
	3	1,4142	1,0000
	4	0,9080	1,0000
	5	0,3129	1,0000

Tabulka č. 1 - koeficienty přenosových funkcí aktivních NDP Butterworthových filtrů [2]

Čebyšev							
$H(p) = \prod_{i=1}^k \frac{1}{b_i p^2 + a_i p + 1}$							
řád	sekce	Amax = 1 dB		Amax = 2 dB		Amax = 3 dB	
n	i	ai	bi	ai	bi	ai	bi
2	1	1,3022	1,5515	1,1813	1,7775	1,0650	1,9305
3	1	2,2156	0,0000	2,7994	0,0000	3,3496	0,0000
	2	0,5442	1,2057	0,4300	1,2036	0,3559	1,1923
4	1	2,5904	4,1301	2,4025	4,9862	2,1853	5,5339
	2	0,3039	1,1697	0,2374	1,1896	0,1964	1,2009
5	1	3,5711	0,0000	4,6345	0,0000	5,6334	0,0000
	2	1,1280	2,4896	0,9090	2,6036	0,7620	2,6530
	3	0,1872	1,0814	0,1434	1,0750	0,1172	1,0686
6	1	3,8437	8,5529	3,5880	10,465	3,2721	11,677
	2	0,6292	1,9124	0,4925	1,9622	0,4077	1,9873
	3	0,1296	1,0766	0,0995	1,0826	0,0815	1,0861
7	1	4,9520	0,0000	6,4760	0,0000	7,9064	0,0000
	2	1,6338	4,4899	1,3258	4,7649	1,1159	4,9863
	3	0,3987	1,5834	0,3067	1,5927	0,2515	1,5944
	4	0,0937	1,0423	0,0714	1,0384	0,0582	1,0348
8	1	5,1019	14,761	4,7743	18,151	4,3583	20,295
	2	0,8916	3,0426	0,6991	3,1353	0,5791	3,1808
	3	0,2806	1,4334	0,2153	1,4449	0,1765	1,4507
	4	0,0717	1,0432	0,0547	1,0461	0,0448	1,0478
9	1	6,3415	0,0000	8,3198	0,0000	10,176	0,0000
	2	2,1252	7,1711	1,7299	7,6580	1,4585	7,8971
	3	0,5624	2,3278	0,4337	2,3549	0,3561	2,3651
	4	0,2076	1,3166	0,1583	1,3174	0,1294	1,3165
	5	0,0562	1,0285	0,0427	1,0232	0,0348	1,0210
10	1	6,3634	22,747	5,9618	28,037	5,4449	31,379
	2	1,1399	4,5167	0,8947	4,6644	0,7414	4,7363
	3	0,3939	1,9665	0,3023	1,9858	0,2479	1,9952
	4	0,1616	1,2569	0,1233	1,2614	0,1008	1,2638
	5	0,0455	1,0277	0,0347	1,0294	0,0283	1,0304

Tabulka č. 2 - koeficienty přenosových funkcí aktivních NDP Čebyševových filtrů [2]



## 4. Laboratorní měření

Při každém laboratorním měření postupujeme dle určitého postupu. Při realizaci se řídíme jednotlivými schématy zapojení. Je potřeba zapojit vstupní napětí na zdroj napětí. Pro naše podmínky postačí konstantní napětí na vstupu 5V. V laboratorních podmínkách nelze nastavit na odporové a kapacitní dekádě tak přesné hodnoty jaké byly vypočteny v teoretické části, proto je třeba zaokrouhlit tyto hodnoty na nejbližší vyšší zapojitelnou možnost. Na generátoru signálu nastavíme postupně deset vhodných frekvencí tak, abychom mohli dobře určit skutečný zlomový kmitočet z připojeného osciloskopu na kanálu dva. Použitými přístroji k našemu měření jsou tedy zdroj napětí DIAMETRAL P230R51D, generátor signálu Agilent 33210A, dvoukanálový osciloskop Tektronix TDS 1002B, stavebnice MODULE BOARD RC, stavebnice SERIES/PARALLEL CIRCUIT, kapacitní dekády C DECADE RC a odporové dekády R DECADE RC.

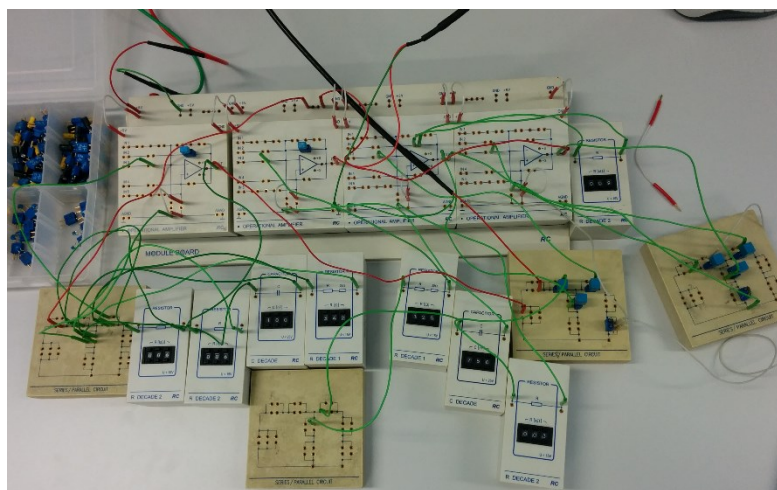
Hodnoty získané z osciloskopu jsou v jednotkách V a mV. Je nezbytné tyto výstupní napětí převést pomocí rovnice (4.1) tak, aby bylo možné je dále zpracovat do grafů na svislou lineární osu, jako hodnoty úrovně přenosu. V grafech je vodorovná osa logaritmická určená pro kmitočet. V tabulkách pro jednotlivé zapojení se nachází také vypočtená absolutní odchylka, která udává rozdíl mezi laboratorním a simulovaným měřením vycházející z rovnice (4.2). V šestém sloupci tabulek je vypočten aritmetický průměr simulovaných a naměřených hodnot vyplývající z rovnice (4.3). V posledním sloupci tabulek leží průměrná absolutní odchylka udávaná aritmetickým průměrem absolutních odchylek, kterou popisuje rovnice (4.4). U frekvencí s \* nastal skutečný zlomový kmitočet.

$$A = 20 \log \frac{U_2}{U_1} \quad (4.1)$$

$$d_i = |x_i - \bar{x}| \quad (4.2)$$

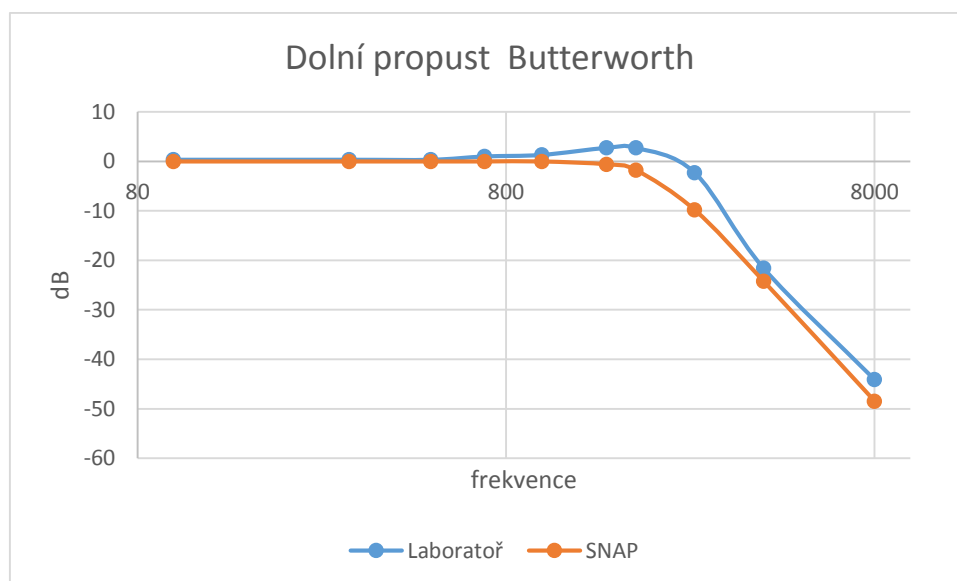
$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (4.3)$$

$$\bar{d} = \frac{d_1 + d_2 + \dots + d_n}{n} \quad (4.4)$$



Obrázek 4.1 - měřící pracoviště

## 4.1 Porovnání Butterworthovy dolní propusti

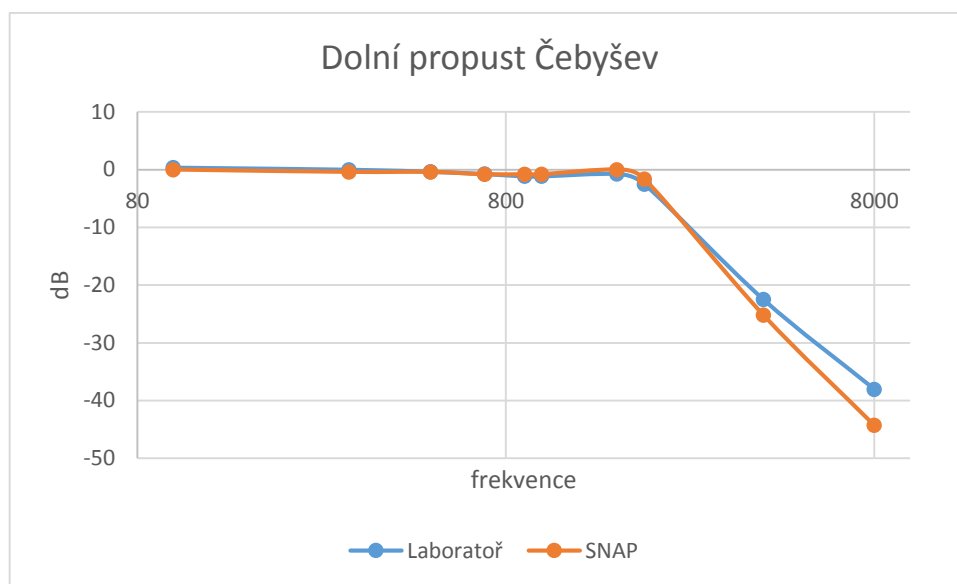


Graf č. 1- pro dolní Butterworthovu propust

f [Hz]	U <sub>2</sub> [mV]	Laboratoř A[dB]	SNAP A[dB]	$d_i$	$\bar{x}$	$\bar{d}$
100	2000	0,355	0	0,355	0.1775	0.1775
300	2000	0,355	0	0,355	0,1775	0.1775
500	2000	0,355	0	0,355	0,1775	0.1775
700	2160	1,023	0	1,023	0,5115	0.5115
1000	2240	1,339	0	1,339	0,6695	0.6695
1500	2640	2,766	-0,576	2,19	1.095	1.671
1800	2640	2,766	-1,731	1,035	0.5175	2.2485
2600*	1480	-2,261	-9,808	7,547	-6.0345	3.7735
4000	160	-21,584	-24,23	2,646	-22.907	1.323
8000	12	-44,083	-48,46	4,377	46.2715	2.1885

Tabulka č. 3 - naměřených a skutečných hodnot pro dolní Butterworthovu propust

## 4.2 Porovnání Čebyševovy dolní propusti

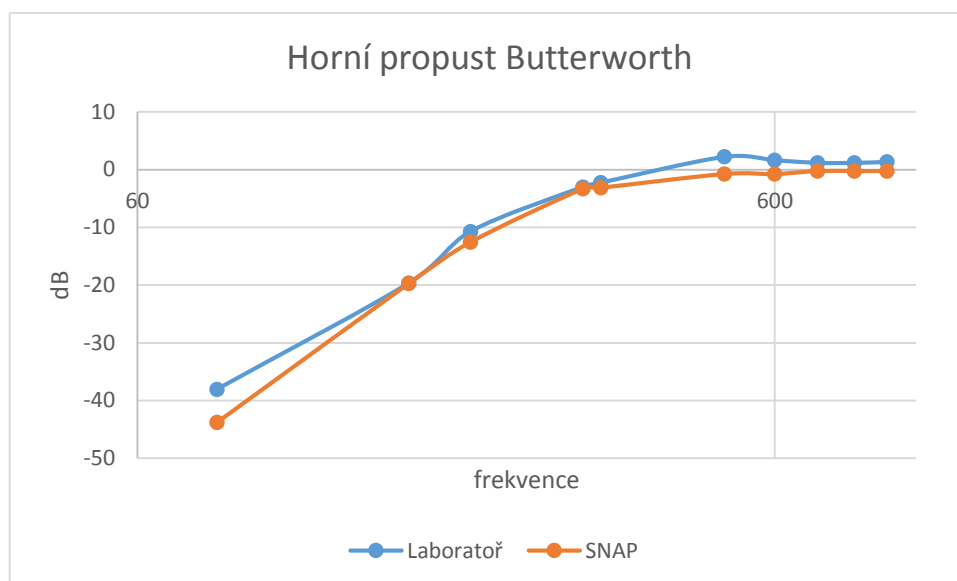


Graf č. 2 - pro dolní Čebyševovu propust

f [Hz]	U <sub>2</sub> [mV]	Laboratoř A[dB]	SNAP A[dB]	$d_i$	$\bar{x}$	$\bar{d}$
100	2000	0,355	0	0,355	0.1775	0.1775
300	1920	0	-0,4064	0,4064	-0.2032	0.2032
500	1840	-0,369	-0,4064	0,0374	-0.3877	0.0187
700	1760	-0,756	-0,8127	0,0567	-0.78435	0.02835
900	1680	-1,159	-0,8127	0,3463	-0.98585	0.17315
1000	1680	-1,159	-0,8127	0,3463	-0.98585	0.17315
1600	1760	-0,756	0	0,756	-0.378	0.378
1900*	1440	-2,499	-1,625	0,874	-2.062	0.437
4000	144	-22,499	-25,19	2,691	-23.8445	1.3455
8000	24	-38,062	-44,29	6,228	-41.176	3.114

Tabulka č. 4 - naměřených a skutečných hodnot pro dolní Čebyševovu propust

### 4.3 Porovnání Butterworthovy horní propusti

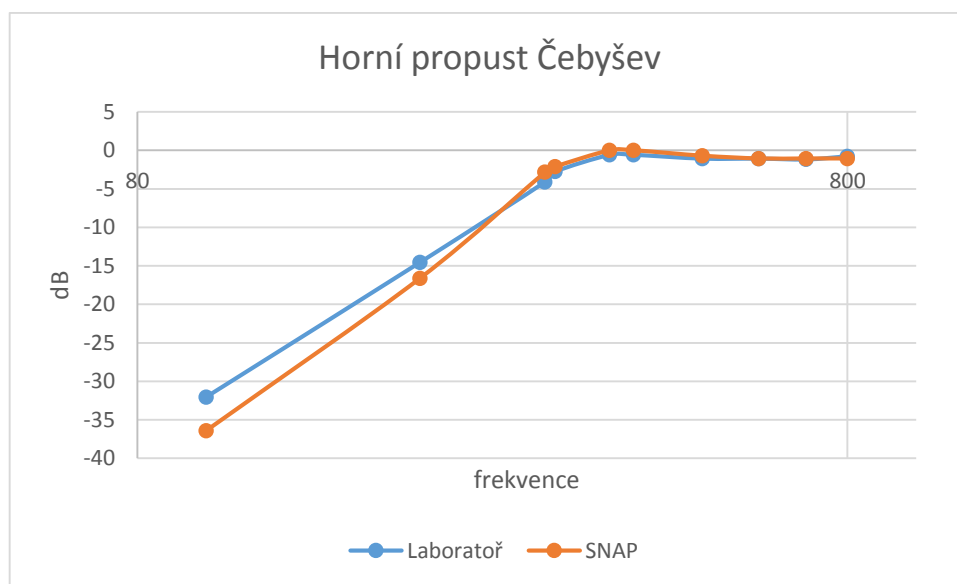


Graf č. 3 - pro horní Butterworthovu propust

f [Hz]	U <sub>2</sub> [mV]	Laboratoř A[dB]	SNAP A[dB]	$d_i$	$\bar{x}$	$\bar{d}$
80	24	-38,062	-43,78	5,718	-40.921	2.859
160	200	-19,646	-19,7	0,054	-19.673	0.027
200	560	-10,702	-12,53	1,828	-11.616	0.914
300	1360	-2,995	-3,304	0,309	-3.1495	0.1545
320*	1480	-2,261	-3,12	0,859	-2.6905	0.4295
500	2480	2,223	-0,742	2,965	0.7405	1.4825
600	2320	1,644	-0,742	2,386	0.451	1.193
700	2280	1,182	-0,2297	1,4117	0.47615	0.70585
800	2280	1,182	-0,2297	1,4117	0.47615	0.70585
900	2240	1,339	-0,2297	1,5687	0.55465	0.78435

Tabulka č. 5 - naměřených a skutečných hodnot pro horní Butterworthovu propust

#### 4.4 Porovnání Čebyševovy horní propusti

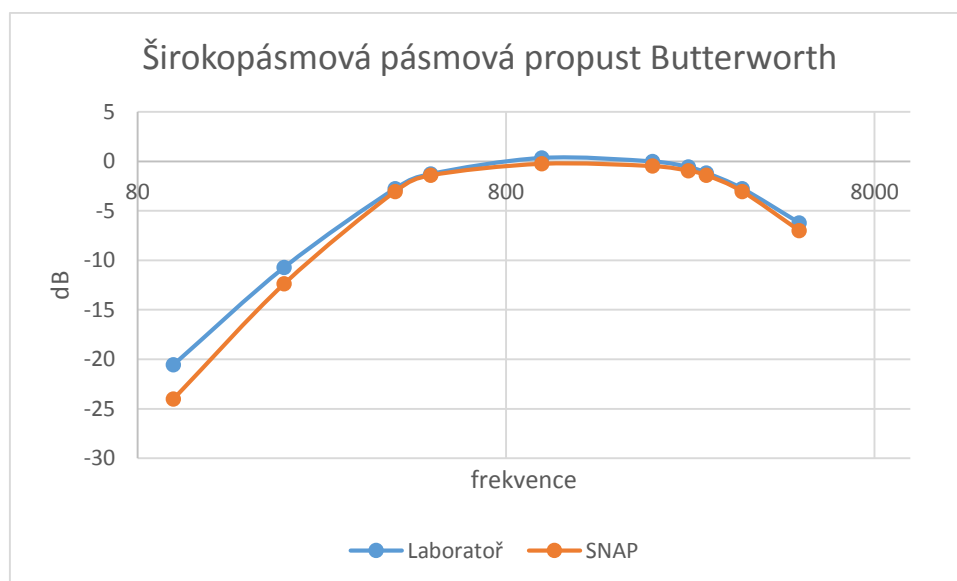


Graf č. 4 - pro horní Čebyševovu propust

f [Hz]	U <sub>2</sub> [mV]	Laboratoř A[dB]	SNAP A[dB]	$d_i$	$\bar{x}$	$\bar{d}$
100	48	-32,041	-36,4	4,359	-34.2205	2.1795
200	360	-14,539	-16,61	2,071	-15.5745	1.0355
300	1200	-4,083	-2,827	1,256	-3.455	0.628
310*	1400	-2,743	-2,12	0,623	-2.4315	0.3115
370	1800	-0,561	0	0,561	-0.2805	0.2805
400	1800	-0,561	0	0,561	-0.2805	0.2805
500	1700	-1,057	-0,7067	0,3503	-0.88185	0.17515
600	1700	-1,057	-1,06	0,003	-1.0585	0.0015
700	1680	-1,159	-1,06	0,099	-1.1095	0.0495
800	1760	-0,756	-1,06	0,304	-0.908	0.152

Tabulka č. 6 - naměřených a skutečných hodnot pro horní Čebyševovu propust

## 4.5 Porovnání širokopásmové Butterworthovy pásmové propusti

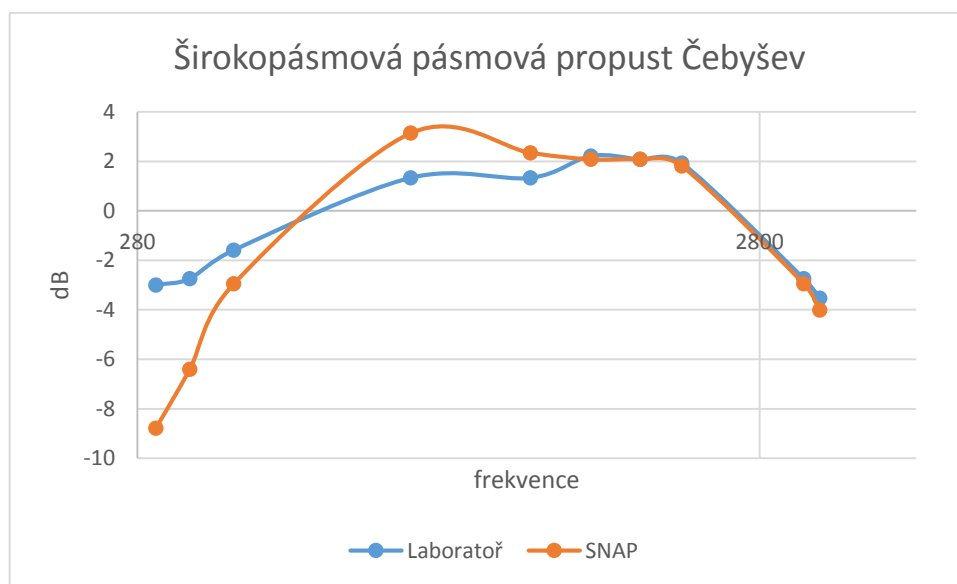


Graf č. 5 - pro širokopásmovou Butterworthovu pásmovou propust

f [Hz]	U <sub>2</sub> [mV]	Laboratoř A[dB]	SNAP A[dB]	$d_i$	$\bar{x}$	$\bar{d}$
100	180	-20,561	-24,02	3,459	-22.2905	1.7295
200	560	-10,702	-12,36	1,658	-11.531	0.829
400*	1400	-2,743	-3,032	0,289	-2.8875	0.1445
500	1660	-1,264	-1,399	0,135	-1.3315	0.0675
1000	2000	0,355	-0,2332	0,5882	0.0609	0.2941
2000	1920	0	-0,4664	0,4664	-0.2332	0.2332
2500	1800	-0,561	-0,9329	0,3719	-0.74695	0.18595
2800	1680	-1,159	-1,399	0,24	-1.279	0.12
3500*	1400	-2,743	-3,032	0,289	-2.8875	0.1445
5000	940	-6,203	-6,996	0,793	-6.5995	0.3965

Tabulka č. 7 - naměřených a skutečných hodnot pro širokopásmovou Butterworthovu pásmovou propust

#### 4.6 Porovnání širokopásmové Čebyševovy pásmové propusti

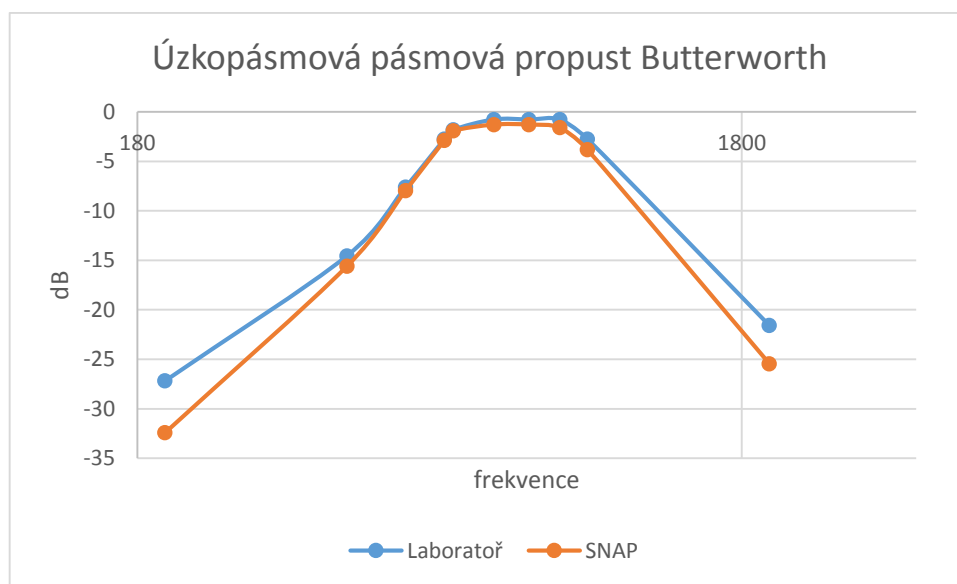


Graf č. 6 - pro širokopásmovou Čebyševovu pásmovou propust

f [Hz]	U <sub>2</sub> [mV]	Laboratoř A[dB]	SNAP A[dB]	$d_i$	$\bar{x}$	$\bar{d}$
300	1360	-2,995	-8,781	5,786	-5.888	2.893
340*	1400	-2,743	-6,396	3,653	-4.5695	1.8265
400	1600	-1,584	-2,951	1,367	-2.2675	0.6835
770	2240	1,339	3,145	1,806	2.242	0.903
1200	2240	1,339	2,35	1,011	1.8445	0.5055
1500	2480	2,223	2,085	0,138	2.154	0.069
1800	2440	2,082	2,085	0,003	2.0835	0.0015
2100	2400	1,938	1,82	0,118	1.879	0.059
3300*	1400	-2,743	-2,951	0,208	-2.847	0.104
3500	1280	-3,522	-4,011	0,489	-3.7665	0.2445

Tabulka č. 8 - naměřených a skutečných hodnot pro širokopásmovou Čebyševovu pásmovou propust

## 4.7 Porovnání úzkopásmové Butterworthovy pásmové propusti



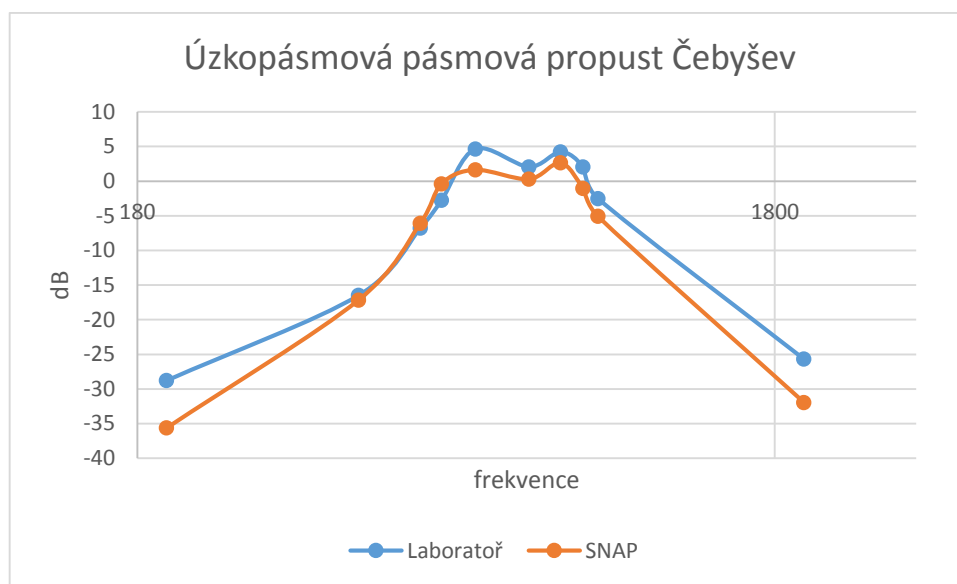
Graf č. 7 - pro úzkopásmovou Butterworthovu pásmovou propust

f [Hz]	U <sub>2</sub> [mV]	Laboratoř A[dB]	SNAP A[dB]	$d_i$	$\bar{x}$	$\bar{d}$
200	84	-27,18	-32,42	5,24	-29.8	2.62
400	360	-14,539	-15,58	1,041	-15.0595	0.5205
500	800	-7,604	-7,951	0,347	-7.7775	0.1735
580*	1400	-2,743	-2,862	0,119	-2.8025	0.0595
600	1560	-1,804	-1,908	0,104	-1.856	0.052
700	1760	-0,756	-1,272	0,561	-1.014	0.258
800	1760	-0,756	-1,272	0,561	-1.014	0.258
900	1760	-0,756	-1,59	0,834	-1.173	0.417
1000*	1400	-2,743	-3,816	1,073	-3.2795	0.5365
2000	160	-21,584	-25,44	3,856	-23.512	1.928

Tabulka č. 9 - naměřených a skutečných hodnot pro úzkopásmovou Butterworthovu pásmovou propust



## 4.8 Porovnání úzkopásmové Čebyševovy pásmové propusti



Graf č. 8 - pro úzkopásmovou Čebyševovu pásmovou propust

f [Hz]	U <sub>2</sub> [mV]	Laboratoř A[dB]	SNAP A[dB]	$d_i$	$\bar{x}$	$\bar{d}$
200	70	-28,764	-35,62	6,856	-32.192	3.428
400	288	-16,478	-17,16	0,682	-16.819	0.341
500	880	-6,776	-6,078	0,698	-6.427	0.349
540*	1400	-2,743	-0,371	2,372	-1.557	1.186
610	3280	4,651	1,643	3,008	3.147	1.504
740	2440	2,082	0,3004	1,7816	1.1912	0.8908
830	3120	4,217	2,65	1,567	3.4335	0.7835
900	2440	2,082	-1,042	3,124	0.52	1.562
950*	1440	-2,499	-5,071	2,572	-3.785	1.286
2000	100	-25,666	-31,93	6,264	-28.798	3.132

Tabulka č. 10 - naměřených a skutečných hodnot pro úzkopásmovou Čebyševovu pásmovou propust

## 5. Závěr

Úkolem této bakalářské práce bylo prostudovat a popsat metodu kaskádní syntézy aktivních filtrů a následně prakticky navrhnout dolní, horní a pásmovou propust podle pokynů vedoucího bakalářské práce. Navrhli jsme osm různých propustí. Dolní Butterworthovu propust, dolní Čebyševovu propust, horní Butterworthovu propust, horní Čebyševovu propust, širokopásmovou Butterworthovu pásmovou propust, širokopásmovou Čebyševovu pásmovou propust, úzkopásmovou Butterworthovu pásmovou propust a úzkopásmovou Čebyševovu pásmovou propust. Pro jednotlivé návrhy jsme si vybrali hodnotu kapacit  $C$ , tak aby byly lehce realizovatelné. Dopočítali jsme hodnoty odporů  $R$ , které jsme byli nuceni zaokrouhlit pro realizovatelné zapojení na stavebnici. Použití přesných hodnot při zapojení návrhu by navýšilo počet součástek, což by bylo velmi nepraktické.

Cílem měření bylo ověřit návrhy simulací programem SNAP a následně ověřit kmitočtové vlastnosti filtrů laboratorním měřením. U dolní Butterworthovy propusti 4. řádu došlo v laboratorním měření k mírnému zvlnění, které v simulaci nenalezneme. Je to dáno zaokrouhlováním součástek v laboratoři. Jde tedy vidět, že celý návrh je velmi citlivý na zapojení, přesto však se chová pořád jako dolní propust. Tudíž propouští nízké kmitočty od nulového až po zlomový kmitočet a tlumí kmitočty vysoké od zlomového výše. Díky zaokrouhlení se také v laboratorním měření změnil skutečný zlomový kmitočet a to z 2 kHz na 2,6 kHz což zapříčinilo celkem vysokou hodnotu absolutní odchylky a to 7,547. U Čebyševovy dolní propusti 3. řádu se odehrálo zvlnění jak u simulace, tak u laboratorního měření podle předpokladu. Zaokrouhlování součástek vedlo ke změně skutečného zlomového kmitočtu z původně zadáných 2 kHz na 1,9 kHz, takže i největší naměřená absolutní odchylka činí 6,228. Jelikož je tato aproximace strmější než aproximace Butterworthova, při stejném zadání nám stačil nižší řád filtru. V praxi to znamená zpravidla levnější návrh filtru a menší nároky na jeho velikost. Horní Butterworthova propust 4. řádu vykazuje v laboratorním měření mírné zvlnění, které je typické pro Čebyševovu aproximaci. Je to dáno zaokrouhlením hodnot součástek, přesto se tato propust stále chová jako horní. Tlumí nízké kmitočty až po zlomový kmitočet a propouští vysoké kmitočty od zlomového výše. Skutečný zlomový kmitočet se změnil z původní hodnoty 300 Hz na 320 Hz. Nejvyšší naměřená absolutní odchylky 5,718 se nachází na kmitočtu 80 Hz. Pro horní propust typu Čebyšev, nám opět při stejném zadání jako u Butterworthovy aproximace stačí pouze filtr 3. řádu. Je to zapříčiněno strmější charakteristikou Čebyševovy aproximace v přechodném pásmu. Skutečný zlomový kmitočet se změnil z 300 Hz na 310 Hz. Největší absolutní odchylka 4,359 se projevila na kmitočtu 100 Hz. V grafickém znázornění jde vidět u simulované i laboratorní části zvlnění v propustném pásmu typickým pro tuto aproximaci. Laboratorní hodnoty u širokopásmové pásmové propusti 4. řádu filtru typu Butterworth se moc od těch simulovaných neliší. U realizace návrhu bylo nutné hodnoty součástek zaokrouhlovat jen minimálně, což se projevilo menšími odchylkami. Nejvyšší absolutní odchylky 3,459 jsme dosáhli na kmitočtu 100 Hz. Skutečný dolní zlomový kmitočet 400 Hz a skutečný horní zlomový kmitočet 3,5 kHz se od zadáných kmitočtů nezměnili. Širokopásmová pásmová propust chová podle teoretických předpokladů. Propouští pouze kmitočty nacházející se mezi dolním a horním zlomovým kmitočtem. V grafickém znázornění jde u širokopásmové pásmové propusti pro Čebyševův filtr 4. řádu vidět jasné zvlnění v propustném pásmu. Z důvodů zaokrouhlování hodnot součástek v laboratoři se posunul horní i dolní zlomový kmitočet. Skutečný dolní zlomový kmitočet se změnil z původní hodnoty 400 Hz na 340 Hz. Skutečný horní zlomový kmitočet se pak změnil z původní zadané hodnoty 3 kHz na 3,3 kHz. Na kmitočtu 300 Hz jsme dosáhli nejvyšší absolutní odchylky 5,786. Úzkopásmová pásmová propust 4. řádu filtru s Butterworthovou aproximací v laboratorním měření vykazuje mírné zvlnění, jež zapříčinilo zaokrouhlování zapojovaných součástek. Skutečný dolní zlomový kmitočet se tedy změnil z hodnoty 500 Hz na 580 Hz, stejně jako skutečný horní zlomový kmitočet, který navýšil hodnotu z 900 Hz na 1 kHz.

Absolutní odchylku s hodnotou 5,24, která byla nejvyšší pro toto měření jsme našli na kmitočtu 200 Hz. K očekávanému zvlnění v propustném pásmu došlo u úzkopásmové Čebyševovy pásmové propusti 4. řádu filtru jak v simulaci, tak i v laboratoři. Skutečný zlomový kmitočet se změnil jen minimálně. Z původních hodnot 500 Hz pro dolní zlomový kmitočet na 540 Hz a z 900 Hz pro horní zlomový kmitočet na 950 Hz. Největší absolutní odchylka 6,856 se nachází v bodě 200 Hz.

Tato bakalářská práce pro mne byla přínosem. Naučila jsem se teoreticky navrhnout filtry n-tého řádu a následně je ověřit simulací v programu SNAP, který pro mne byl novinkou. Následné ověření praktickým měřením dopadlo podle mých očekávání dle teoretické části. V měření došlo k mírným nepřesnostem kvůli zaokrouhlování hodnot součástek.

## Literatura

- [1] HÁJEK, Karel a Jiří SEDLÁČEK. *Kmitočtové filtry*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002, 535 s. ISBN 80-7300-023-7.
- [2] GAJDOŠÍK, Libor. *Návrh analogových filtrů*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2013, 239 s. ISBN 978-80-7300-468-2.
- [3] VRBA, Kamil. *Technika analogových obvodů a systémů: Sbíрка příkladů: Určeno pro posl. fak. elektrotechn.* 3. vyd. Brno: VUT, 1989, 225 s. ISBN 80-214-1060-4.
- [4] elektrické filtry – základní pojmy. Jiří Petržela [online]. 2012 [cit. 2012-12-22]. Dostupné z: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/MTEO/belf/zakladni%20pojmy.pdf>
- [5] TIETZE, U, Ch SCHENK a E SCHMID. *Electronic circuits: design and applications*. New York: Springer-Verlag, c1991, xiii, 928 p. ISBN 038750608x.
- [6] DOSTÁL, Jiří. *Operační zesilovače*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005, xxix, 504 s. ISBN 80-7300-049-0.
- [7] PUNČOCHÁŘ, Josef. *Operační zesilovače: historie a současnost*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002, 66 s. ISBN 80-7300-047-4.
- [8] PUNČOCHÁŘ, Josef. *Operační zesilovače v elektronice*. 2. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 1996, 479 s. ISBN 80-901984-3-0.

## Seznam obrázků

Obrázek 1.1.1 – Kaskádní řazení.....	3
Obrázek 1.1.2 - Základní typy kmitočtových charakteristik filtrů .....	4
Obrázek 1.2.1 – Dolní propust.....	5
Obrázek 1.3.1 – Horní propust.....	6
Obrázek 1.3.2 – Frekvenční propust.....	6
Obrázek 1.4.1 – Pásmová propust.....	7
Obrázek 1.5.1 – Pásmová zádrž.....	8
Obrázek 1.6.1.1 – Butterworthova aproximace.....	8
Obrázek 1.6.2.1 – Čebyševova aproximace.....	9
Obrázek 2.1.1 – Toleranční schémata.....	10
Obrázek 2.2.1.1 – Transformace dolní propusti na normovanou dolní propust .....	11
Obrázek 2.2.2.1– Transformace horní propusti na normovanou dolní propust .....	11
Obrázek 2.2.3.1 – Transformace pásmové propusti na normovanou dolní propusti .....	12
Obrázek 2.2.4.1 – Transformace pásmové zádrže na normovanou dolní propust .....	13
Obrázek 3.1.1 – Dolní propust 4. řádu pro Butterworthův filtr.....	15
Obrázek 3.1.2 – Modulová kmitočtová char. pro Butterworthovu dolní propust 4. řádu .....	16
Obrázek 3.2.1 – Dolní propust 3. řádu pro Čebyševův filtr.....	17
Obrázek 3.2.2 – Modulová kmitočtová char. pro Čebyševovu dolní propust 3. řádu.....	18
Obrázek 3.3.1 – Horní propust 4. řádu pro Butterworthův filtr.....	19
Obrázek 3.3.2 – Modulová kmitočtová char. pro Butterworthovu horní propust 4. řádu.....	19
Obrázek 3.4.1 – Horní propust 3. řádu pro Čebyševův filtr.....	21
Obrázek 3.4.2 – Modulová kmitočtová char. pro Čebyševovu horní propust 3. řádu.....	21
Obrázek 3.5.1 – Širokopásmová pásmová propust 4. řádu pro Butterworthův filtr.....	23
Obrázek 3.5.2 – Modulová kmitočtová charakteristika pro Butterworthovu širokopásmovou pásmovou propust 4. řádu.....	23
Obrázek 3.6.1 – Širokopásmová pásmová propust 4. řádu pro Čebyševův filtr.....	25
Obrázek 3.6.2 – Modulová kmitočtová charakteristika pro Čebyševovu širokopásmovou pásmovou propust 4. řádu.....	25
Obrázek 3.7.1 – Úzkopásmová pásmová propust 4. řádu pro Butterworthův filtr.....	27
Obrázek 3.7.2 – Modulová kmitočtová charakteristika pro Butterworthovu úzkopásmovou pásmovou propust 4. řádu.....	27
Obrázek 3.8.1 – Úzkopásmová pásmová propust 4. řádu pro Čebyševův filtr.....	29

Obrázek 3.8.2 – Modulová kmitočtová charakteristika pro Čebyševovu úzkopásmovou pásmovou propust 4. řádu.....	29
Obrázek 4.1 – Měřicí pracoviště.....	32

## Seznam tabulek

Tabulka č. 1 - koeficienty přenosových funkcí aktivních NDP Butterworthových filtrů .....	30
Tabulka č. 2 koeficienty - přenosových funkcí aktivních NDP Čebyševových filtrů .....	31
Tabulka č. 3 - naměřených a skutečných hodnot pro dolní Butterworthovu propust.....	33
Tabulka č. 4 - naměřených a skutečných hodnot pro dolní Čebyševovu propust.....	34
Tabulka č. 5 - naměřených a skutečných hodnot pro horní Butterworthovu propust.....	35
Tabulka č. 6 - naměřených a skutečných hodnot pro horní Čebyševovu propust.....	36
Tabulka č. 7 - naměřených a skutečných hodnot pro širokopásmovou Butterworthovu pásmovou propust.....	37
Tabulka č. 8 - naměřených a skutečných hodnot pro širokopásmovou Čebyševovu pásmovou propust...	38
Tabulka č. 9 - naměřených a skutečných hodnot pro úzkopásmovou Butterworthovu pásmovou propust.....	39
Tabulka č. 10 - naměřených a skutečných hodnot pro úzkopásmovou Čebyševovu pásmovou propust...	40

## Seznam grafů

Graf č. 1 - pro dolní Butterworthovu propust.....	33
Graf č. 2 - pro dolní Čebyševovu propust.....	34
Graf č. 3 - pro horní Butterworthovu propust.....	35
Graf č. 4 - pro horní Čebyševovu propust.....	36
Graf č. 5 - pro širokopásmovou Butterworthovu pásmovou propust.....	37
Graf č. 6 - pro širokopásmovou Čebyševovu pásmovou propust.....	38
Graf č. 7 - pro úzkopásmovou Butterworthovu pásmovou propust.....	39
Graf č. 8 - pro úzkopásmovou Čebyševovu pásmovou propust.....	40



## Seznam příloh

- Příloha A: Soubor pro otevření v programu SNAP – Dolní propust Butterworth
- Příloha B: Soubor pro otevření v programu SNAP – Dolní propust Čebyšev
- Příloha C: Soubor pro otevření v programu SNAP – Horní propust Butterworth
- Příloha D: Soubor pro otevření v programu SNAP – Horní propust Čebyšev
- Příloha E: Soubor pro otevření v programu SNAP – Širokopásmová pásm. propust Butterworth
- Příloha F: Soubor pro otevření v programu SNAP – Širokopásmová pásmová propust Čebyšev
- Příloha G: Soubor pro otevření v programu SNAP – Úzkopásmová pásmová propust Butterworth
- Příloha H: Soubor pro otevření v programu SNAP – Úzkopásmová pásmová propust Čebyšev